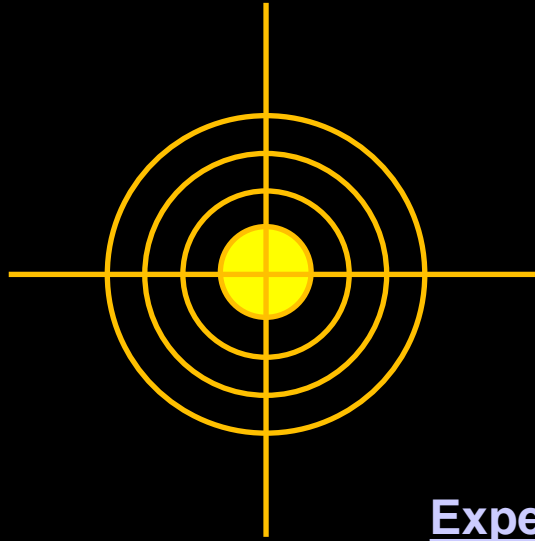


Experiment 1:

- Schubkraft: 6.7 pN
- Leistung Laserpointer: < 1 mW



Optimierungspotenzial:

- Steigerung der Laserausgangsleistung
- Fokussierung der Laserstrahlung
- Verwendung kurzer Laserpulse
- Anpassung von Material und Wellenlänge

Experiment 2 (CLEANSPLACE):

- Mittlere Laserleistung: 33 W
- 3 ns Pulse: 94 MW (Puls)
- 3 mm Fokus: 190 MW/mm²
- Aluminium, $\lambda = 1064$ nm
- Energiedichte: 4.7 J/cm²
- Schubkraft: 700 μ N
- $c_m = 21$ μ N/W

Laserantriebe

Unkonventionelle Raumfahrtantriebe
Vertiefungsfach Raumfahrtsysteme

IRS, Universität Stuttgart

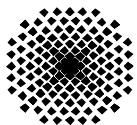
13.01.2016



Dr. Stefan Scharring

Institut für Technische Physik, Stuttgart

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

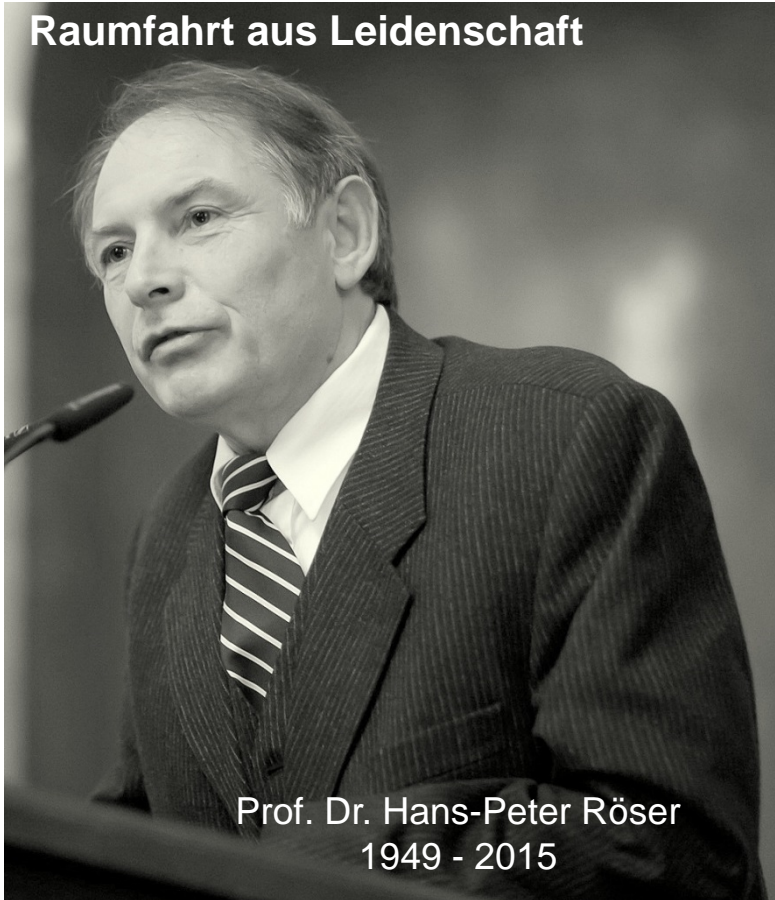


*Wenn Du ein Schiff bauen willst,
dann trommle nicht Männer zusammen,
um Holz zu beschaffen, Aufgaben zu vergeben
und die Arbeit einzuteilen,
sondern lehre die Männer die Sehnsucht nach
dem weiten, endlosen Meer.*

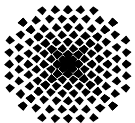
Antoine de Saint-Exupery.



Raumfahrt aus Leidenschaft



Prof. Dr. Hans-Peter Röser
1949 - 2015



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Upload von
Antriebsenergie
MW

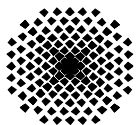
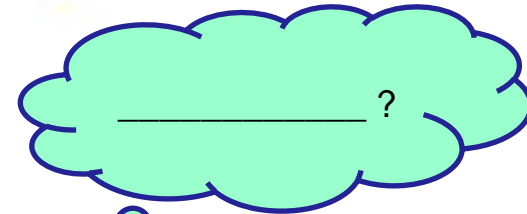
Minimaler
Treibstoffverbrauch
<1 %

Satelliten präzise
positionieren
nm - μ m

Weltraumschrott
aufspüren und
verglühen lassen
cm - dm

*Man kann nur erforschen, was man vorher
geträumt hat. Die Wissenschaft entwickelt
sich viel eher auf einer Träumerei als auf einer
Erfahrung, und es bedarf sehr vieler Erfahrungen,
um die Nebel eines Traumes zu zerstreuen.*

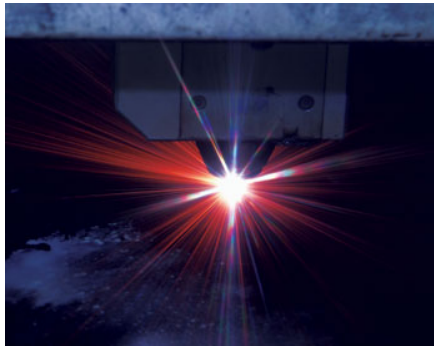
Gaston Bachelard



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

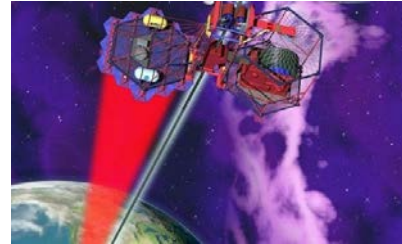




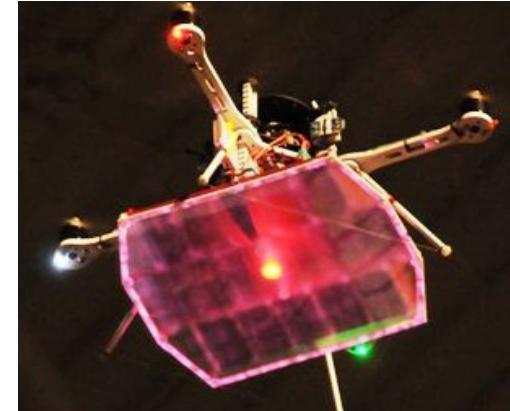
Laserschneiden
von Stahl



Laserschwert



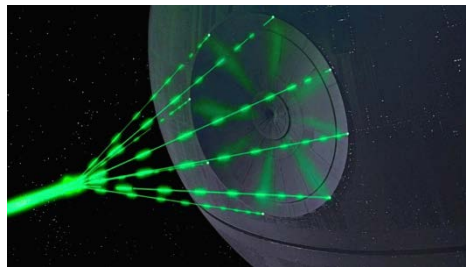
Weltraumfahrstuhl



Quadrocopter



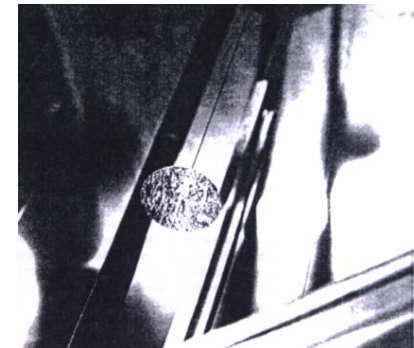
Augen-OP (Lasik)



Todesstern

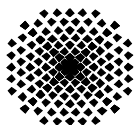


Photonenantrieb



Lasersegel

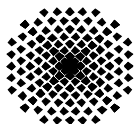
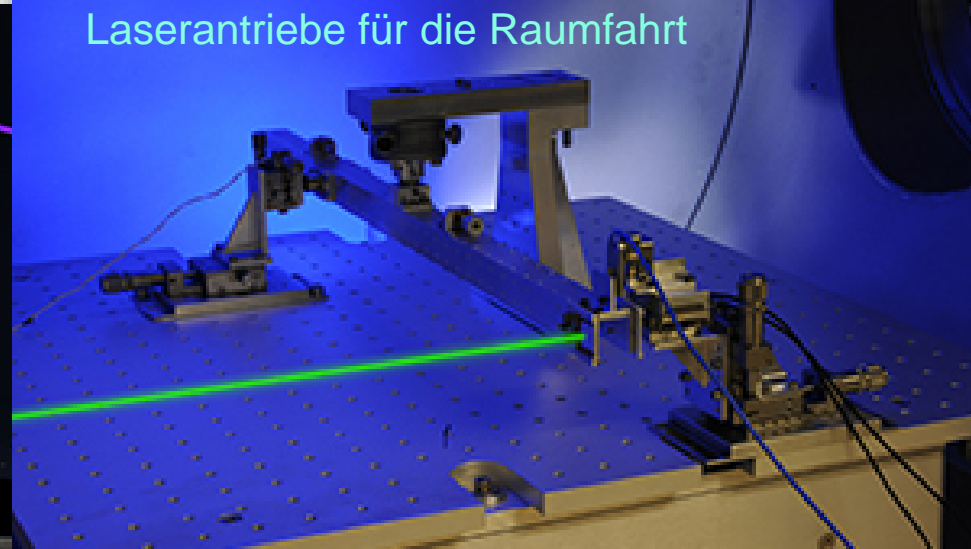
Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHMEI II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de





Universität
Stuttgart

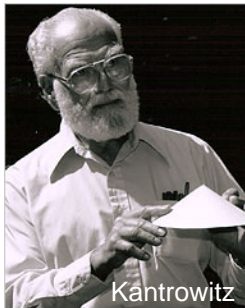
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Geschichte



E. Sänger

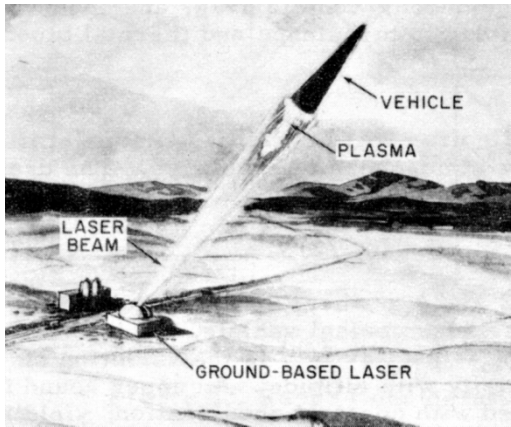
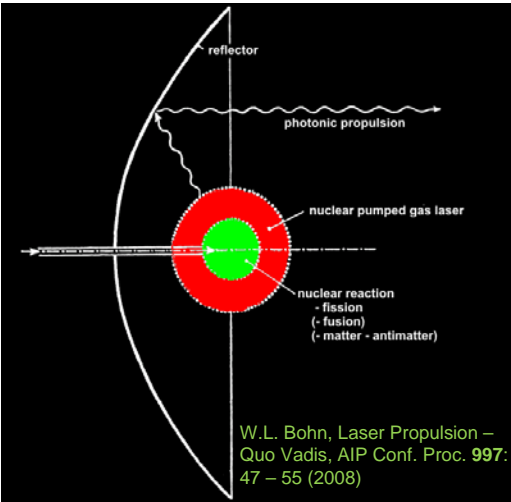


Kantrowitz



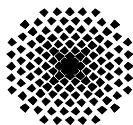
Myrabo

1953	E. Sänger	Konzept Photonenrakete
1962	G.A. Askarian	Laser-ablativer Impulsübertrag
1972	A.Kantrowitz	Konzept bodengestützter Antrieb
1995	Liukonen	Flug im Labor (CO ₂ -Laser)
1997	Myrabo	Freiflug
1998	DLR	Vertikalflug im Labor
2000	Myrabo	Weltrekordflug, 71 m
2002	1. International Symposium on Beamed Energy Propulsion	



Pirri et al, Laser propulsion, AIAA paper 72-719 (1972)

Experimentelle Arbeitsgruppen: USA, Russland, Deutschland, Japan, China, Brasilien



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Definitionen und Beispiele

Definition Laserantrieb:

Antrieb, bei dem die Laserenergie einen substantiellen und unverzichtbaren Beitrag zur Bewegungsenergie liefert

Allgemeine Definition Lightcraft:

Antrieb, der auf gerichteter elektromagnetischer Strahlung beruht (Laser oder Mikrowelle)

Lightcraft im engeren Sinne:

Antrieb durch laser-gestützte Detonationen mit räumlich getrennter Laserquelle

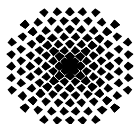
Photonenantrieb



Laserthermischer Antrieb



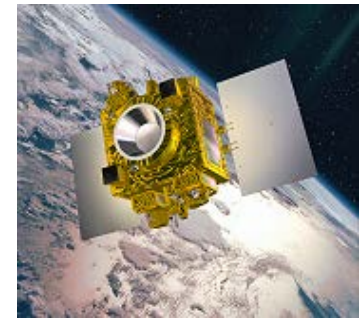
Laser
Light-
craft



Beamed Energy Propulsion – onboard laser



GRACE: © NASA/JPL-Caltech



MICROSCOPE: © CNES

Alternative Lageregelung im sub- μN bis mN-Bereich für

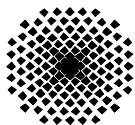
- wissenschaftliche Missionen
- Formationsflüge zur Erdbeobachtung

Vollständige Vermeidung beweglicher Komponenten für

- langjährige Betriebsdauer
- *trägheitsfreien Betrieb*

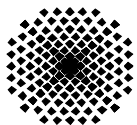
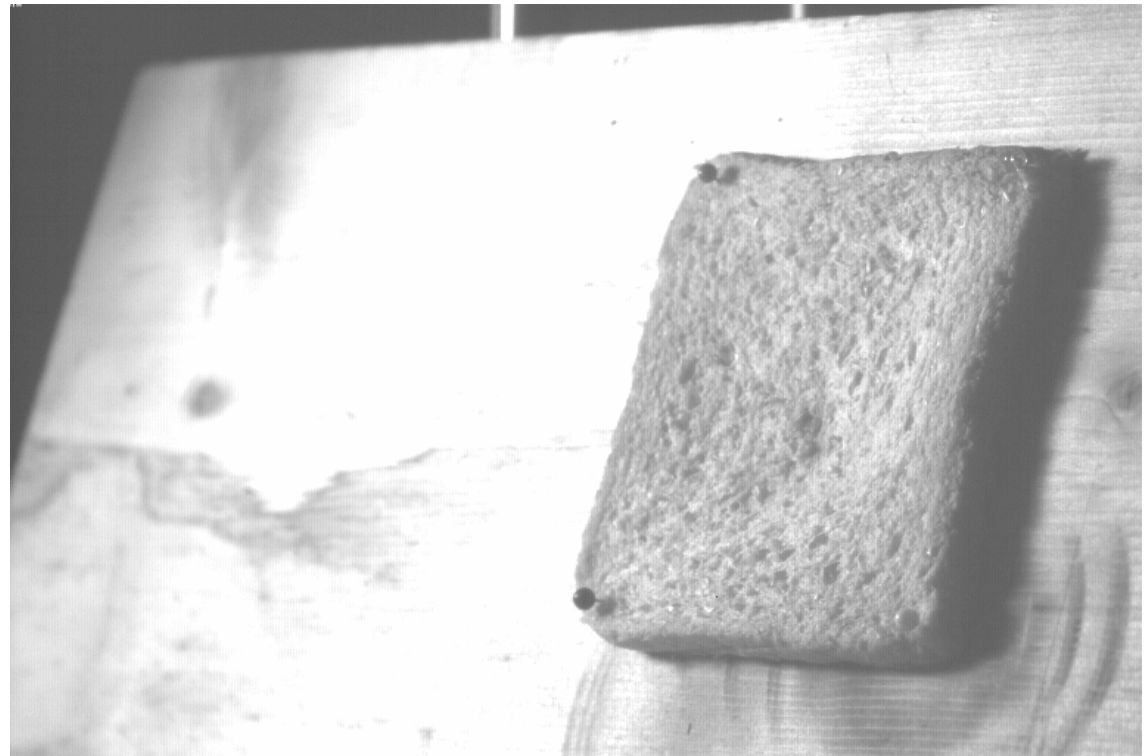
Minimale Restbeschleunigung $< 10^{-14} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$

Dittus et al, *Applications of Microthrusters for Satellite Missions and Formation Flights Scenarios*,
Beamed Energy Propulsion, AIP Conf. Proc. **1402**, 367-373 (2011)



Beispiel: Rückstoß durch Materialabtrag (*unkooperativ*)

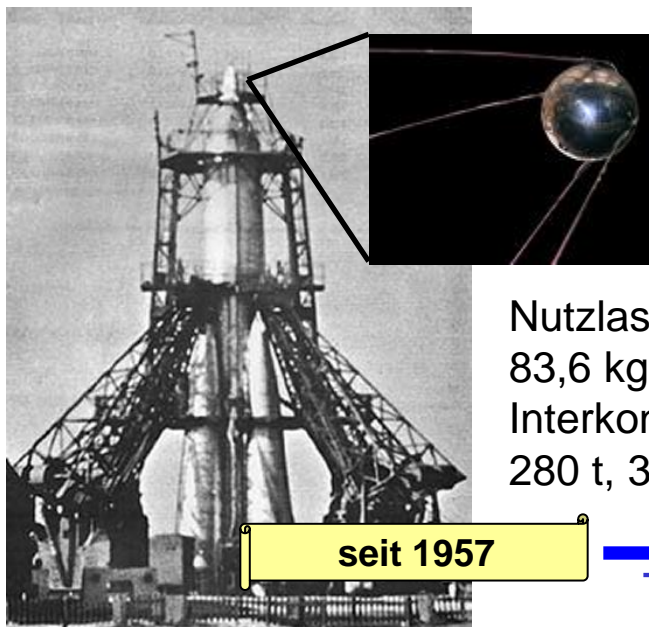
- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **unfokussiert**:
 $\sim 290 \text{ kW} / \text{cm}^2$
(solar: $140 \text{ mW} / \text{cm}^2$)
- Repetitionsrate: 50 Hz
- Laserstrahldurchmesser:
8 cm



Beamed Energy Propulsion – Ground-based Laser

Transport des Energieträgers

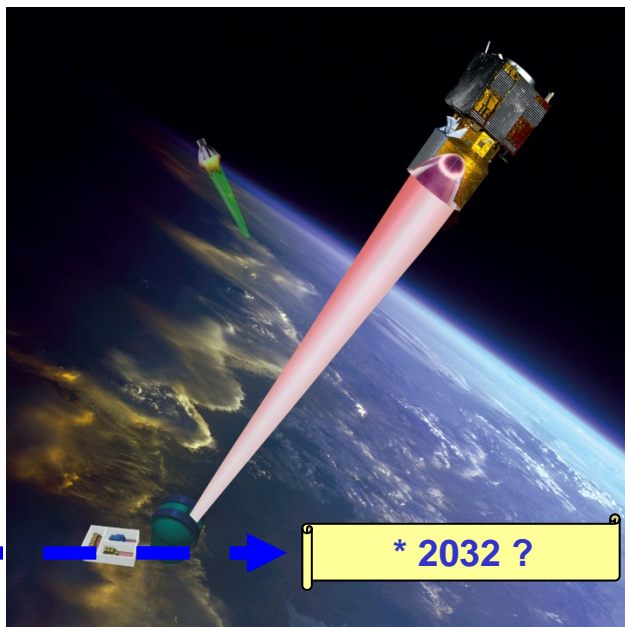
Externe Energiequelle



Nutzlast: Sputnik-I,
83,6 kg, 58 cm
Interkontinentalrakete:
280 t, 34 m

seit 1957

75 Jahre F&E?



* 2032 ?



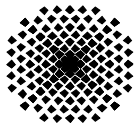
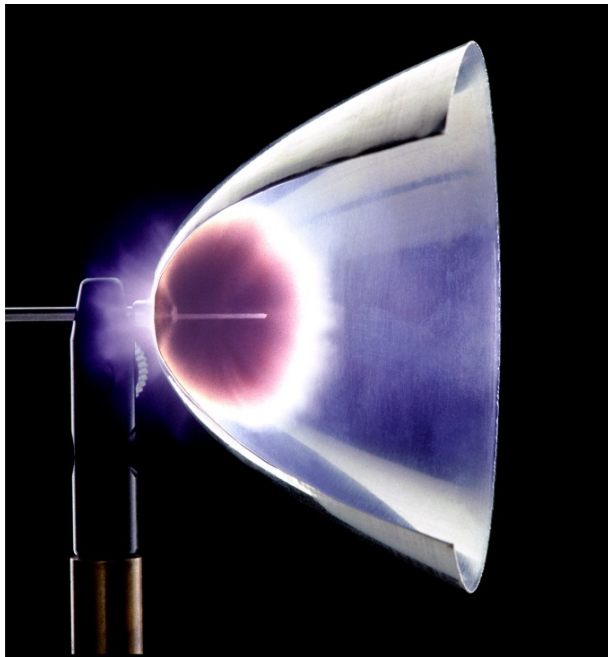
seit 1804

75 Jahre F&E



* 1879

- Mittlere optische Leistung: 7,5 kW
- Laserpuls: $\sim 10 \mu\text{s}$, 150 J
- Leistungsdichte, **fokussiert**:
 $3,3 \text{ MW} / \text{cm}^2$
- Repetitionsrate: 50 Hz



Inhalt

1 Einleitung

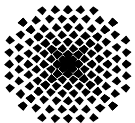
2 Laser

- > **2.1 Funktionsprinzip**
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

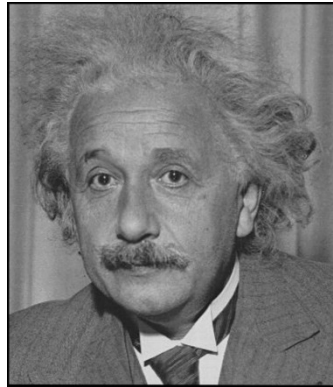
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

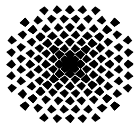
4 Zusammenfassung

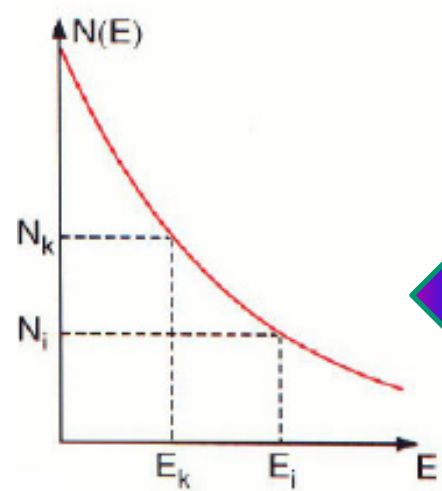


Geschichte

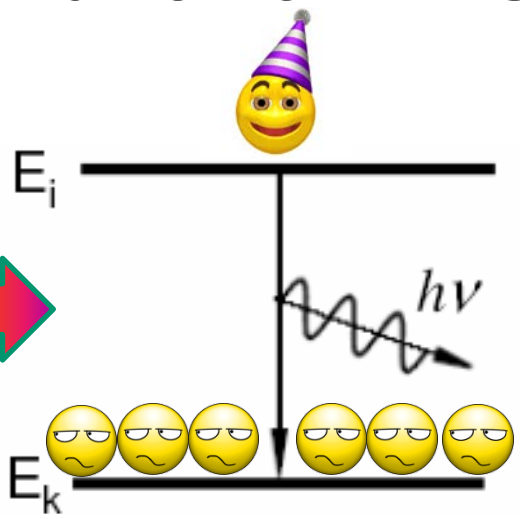


- 1916 Postulat der Stimulierten Emission (Albert Einstein)
- 1951 Erfindung des MASERs
(Charles Townes, Nikolai Basov, Alexander Prokorov)
- 1960 Erfindung des Rubin-Lasers
- 60`s Halbleiterlaser, Nd:YAG-Laser, Argon-, CO₂, chemische Laser,
Farbstofflaser, Metaldampfaser
- 70`s Excimer-Laser, Free-Electron-Laser, COIL





Thermisches Gleichgewicht,
z.B. für Molekülschwingungen,
Elektronenzustände



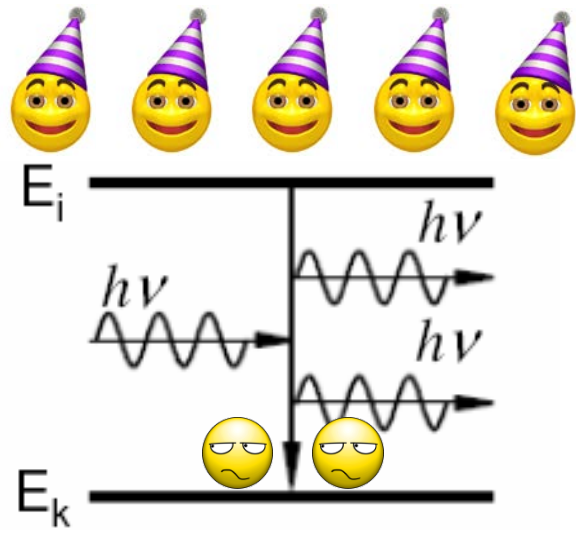
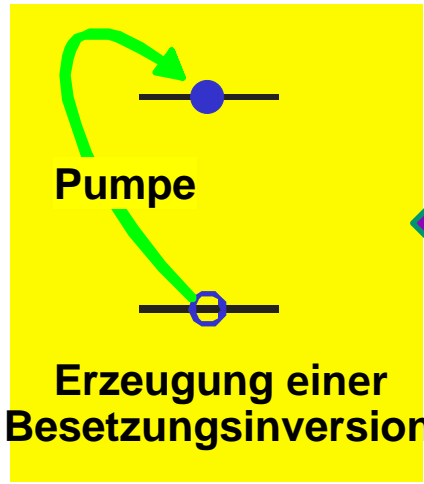
Spontane Emission

Diskrete (quantisierte)
Energieniveaus



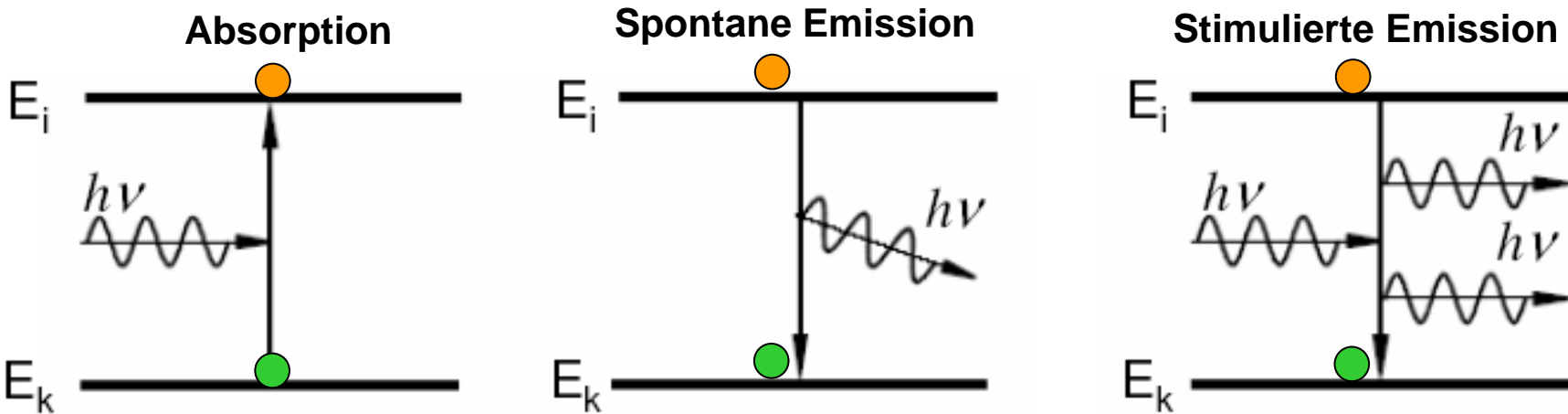
$$E_{rot} = 1/2 \cdot M \cdot \omega^2 R^2$$

Kontinuierliche
Energieübergänge



Stimulierte Emission

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

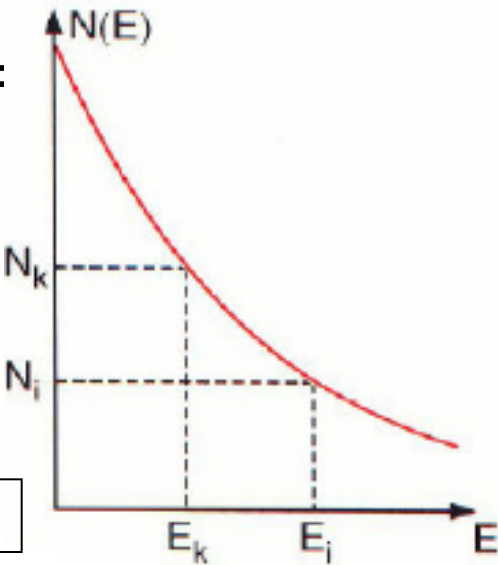


Besetzung der Energieniveaus im thermischen Gleichgewicht:

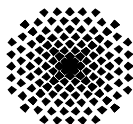
$$\frac{N_i}{N_k} = \frac{g_i}{g_k} e^{-(E_i - E_k)/kT} = \frac{g_i}{g_k} e^{-h\nu/kT}$$

(Boltzmann-Verteilung)

N: Besetzungszahl
g: Entartung der Energieniveaus

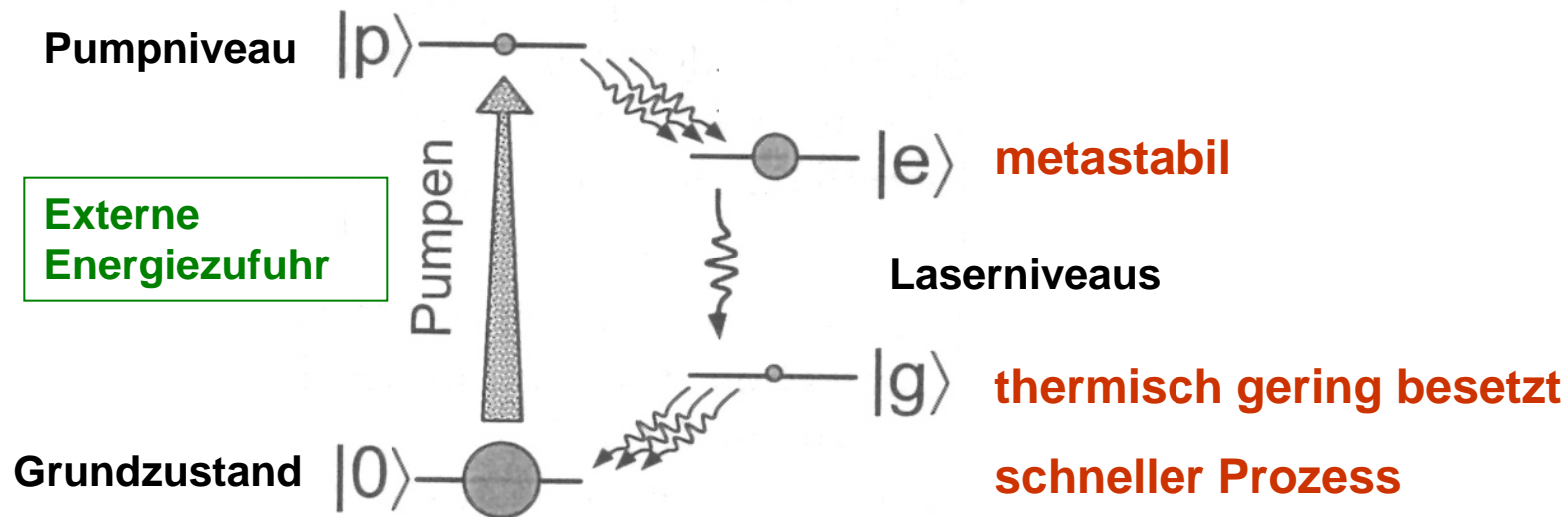


Lichtverstärkung → Besetzungsinversion erforderlich



Pumpprozess

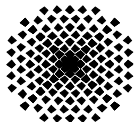
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Pumpprozesse:

- Elektronenstoß
- Stöße zwischen Molekülen
- chemische Reaktionen
- ...

D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Teubner-Verlag 1999, Leipzig



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Laserresonator

Pumpenergie

Kohärentes Licht:

Gleichheit von

- Frequenz
- Phase
- Richtung

Gute Fokussierbarkeit

Resonator (Kavität)

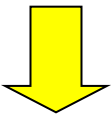
Verstärkungsmedium

Emittierter
Laserstrahl

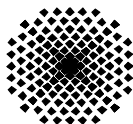
Endspiegel
(voll reflektierend)

Auskoppelspiegel
(teilreflektierend)

Kleinsignalverstärkung (materialspezifisch) >> Absorption



Lichtverstärkung („Photonenlawine“)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

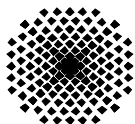
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > **2.2 Beispiele**
 - > 2.2.1 Halbleiterlaser
 - > 2.2.2 Festkörperlaser
 - > 2.2.3 Gaslaser
 - > 2.2.4 Andere Laserquellen
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

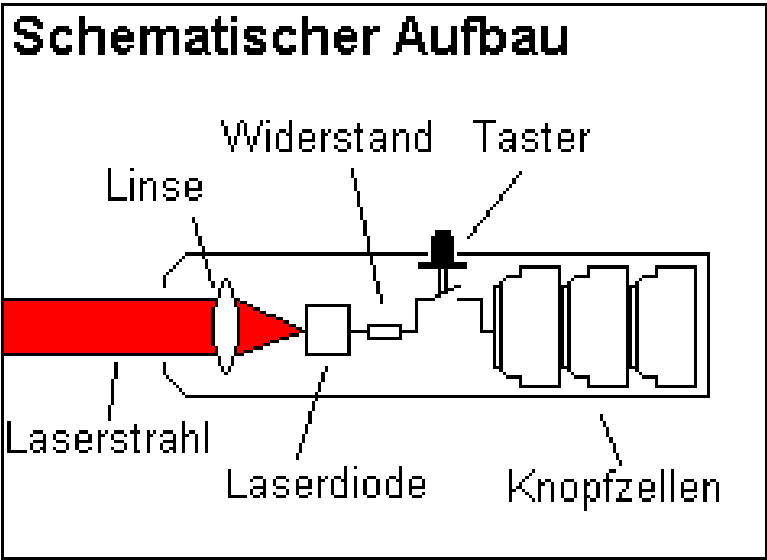
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung

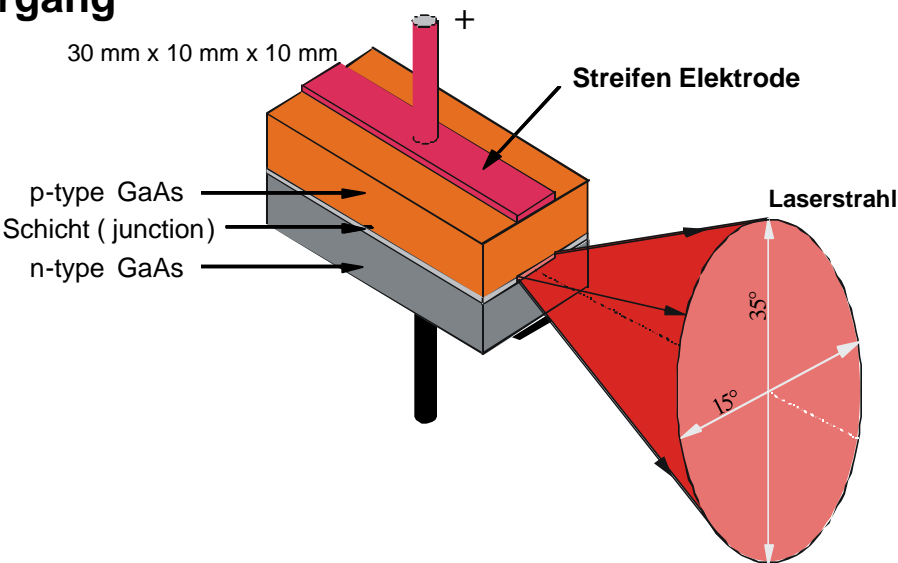


Halbleiterlaser

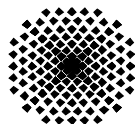
- **Lichtemission:** Rekombination am pn-Übergang
- **Pumpprozess:** Gleichstrom
- **Resonator:** Teilreflektierende Endflächen



Beispiel: Laserpointer
 $P_{opt} < 1 \text{ mW}$: augensicher
bei Lidschlussreflex



- + hoher Wirkungsgrad (bis 50%, IR)
- + Einzelemitter: 100 μW ... 10 W
- + kompakte Baugröße
- limitierte Strahlqualität



Festkörperlaser

Laseraktive Ionen + Wirtsmaterial (Glas, Kristall, Polymer...)

Beispiel: Nd:YAG (Reines 4-Niveau-System)

Emission des oberen Laserniveaus ${}^4F_{3/2}$ (230 μ s):

- 1320 nm (~14%) / **1064 nm (~55%)** / 946 nm (~30%)

Pumpprozess: optisch (nahes Infrarot)

- Gasentladungslampen
- Laserdioden

Thermisches Management?

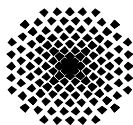
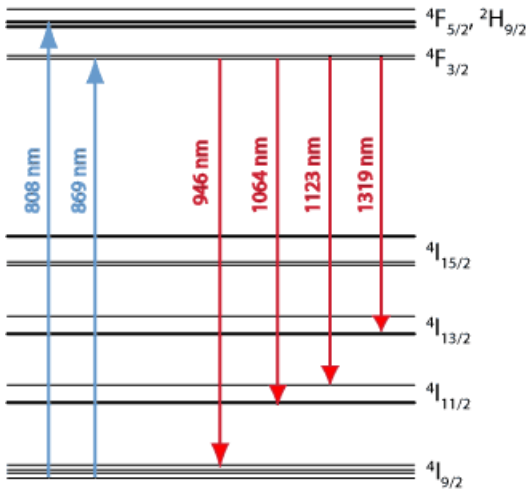
- Erwärmung
- Ausdehnung
- Brechungsindexgradient

NOVA – Laser (1984 - 1999)

Fusionsexperimente:

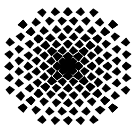
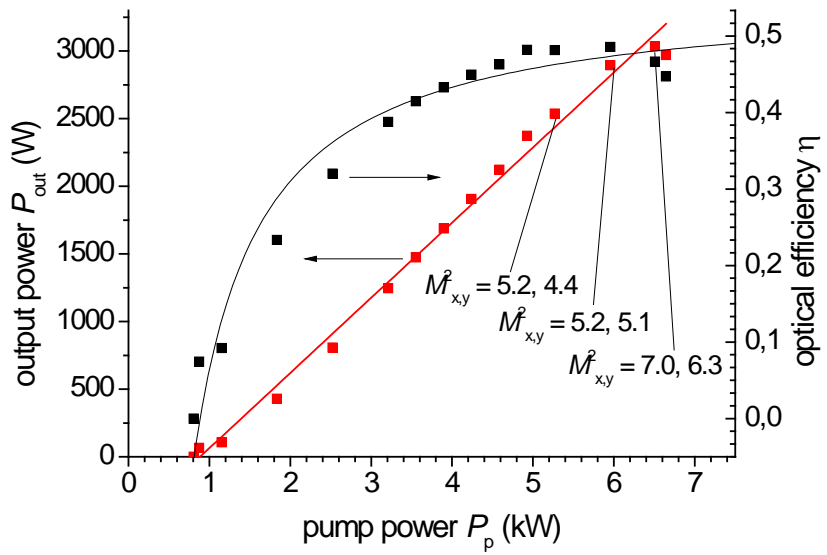
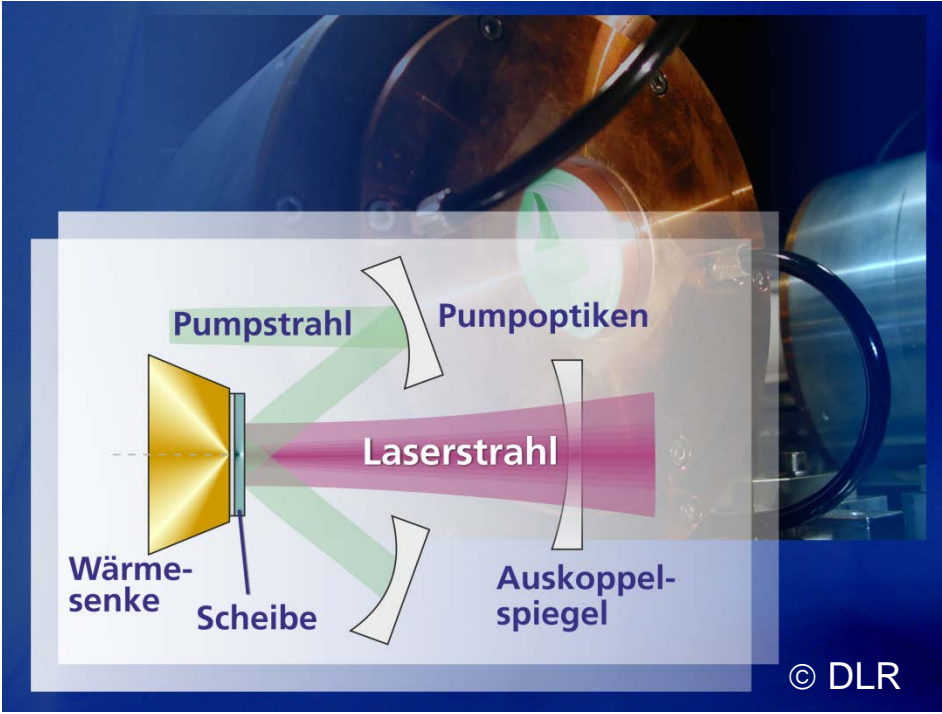
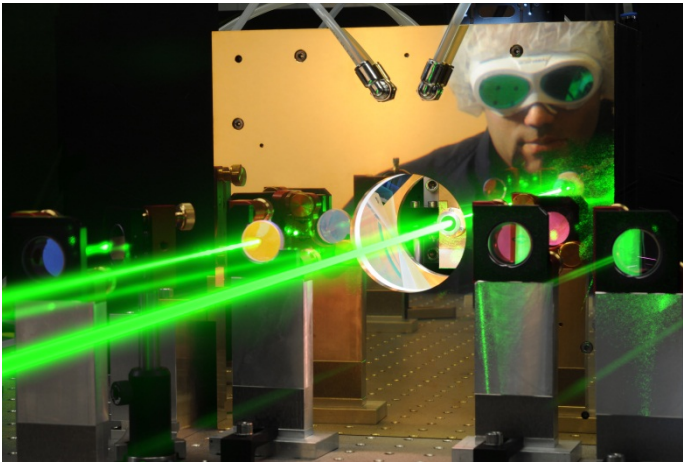
Nd:Glas

100 kJ gepulst (2...4 ns), $\lambda=1054$ nm

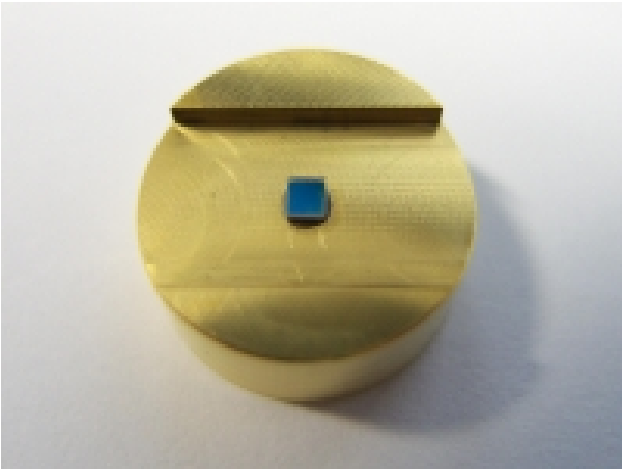
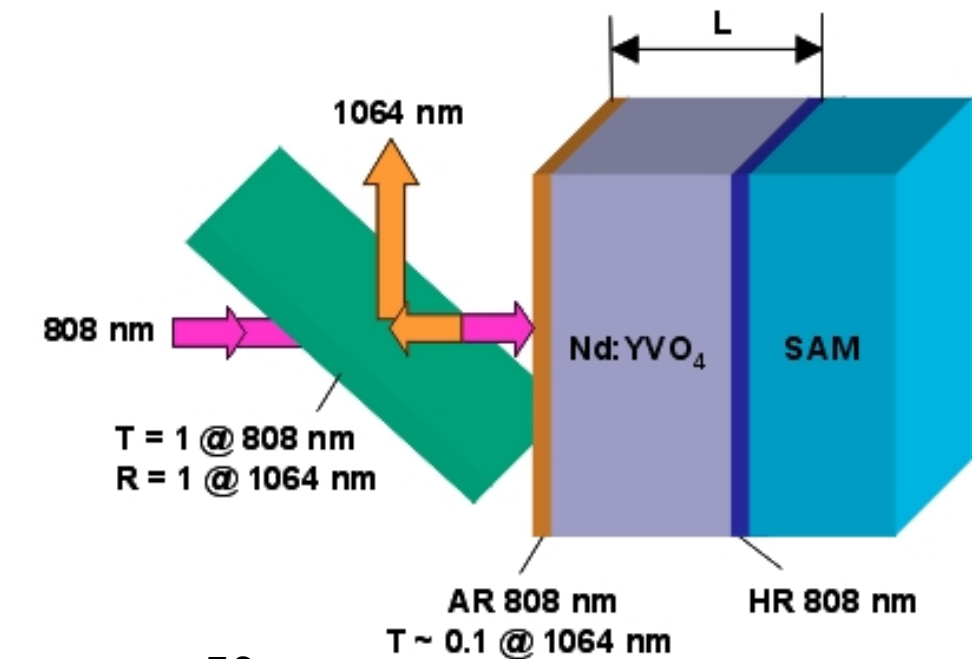


Scheibenlaser

- Gemeinsame Erfindung DLR-TP / IFSW Uni Stuttgart
- 100 – 200 μm Kristallscheibe, z.B. Yb:YAG
- Pumpmodule: Laserdioden
- cw-Betrieb im kW-Bereich, gut skalierbar
- gepulster Betrieb fs – ns möglich
- hohe Brillanz (Leistung x Strahlqualität)



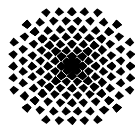
Mikrochipi Laser



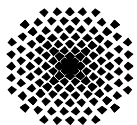
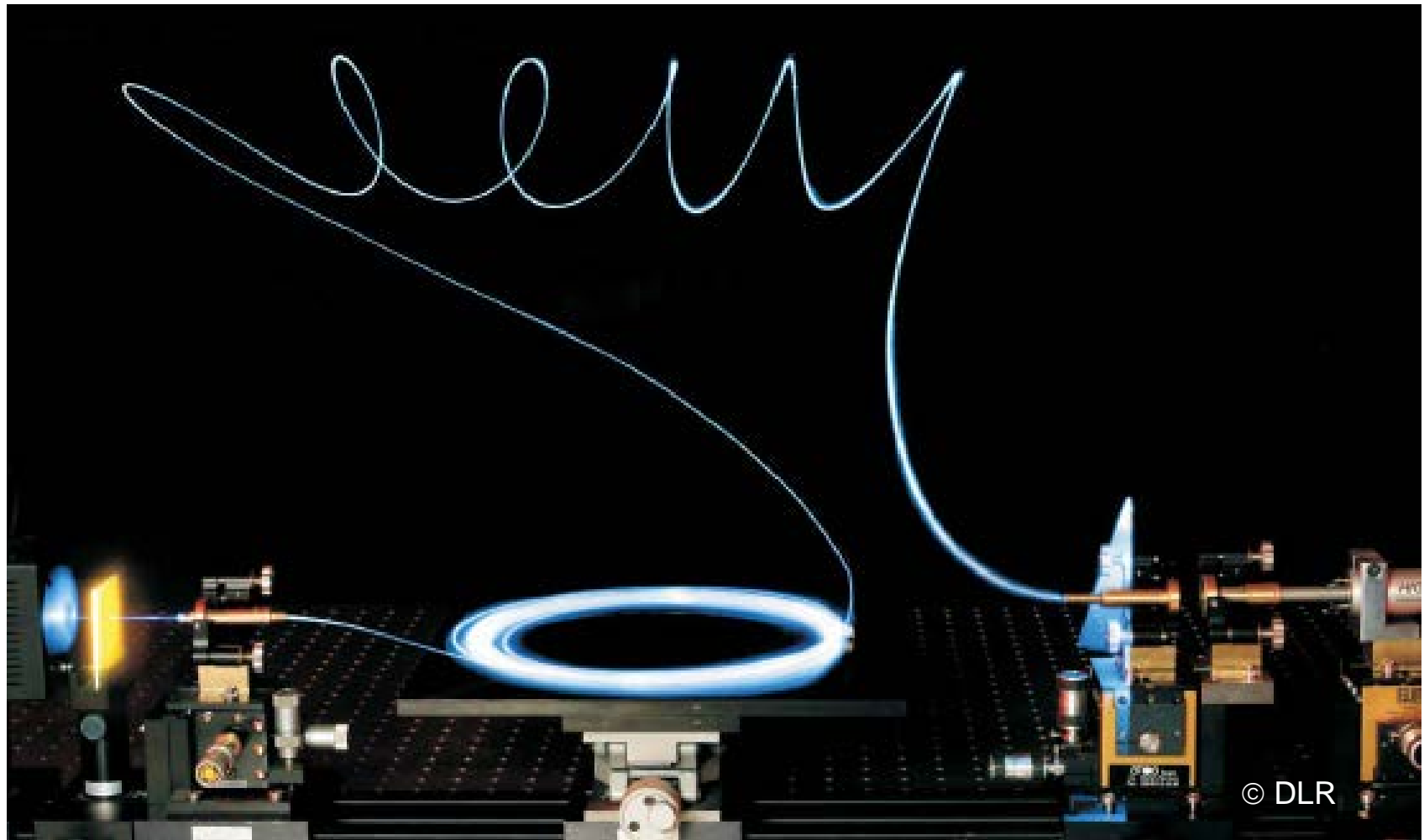
Pumpfleck \varnothing 40 – 80 μm

τ 50 ps
 f_{rep} 100 kHz – 3 MHz
 E_L 4 nJ

© BATOP optoelectronics, Data sheet microchip MC-1064-50ps



Faserlaser



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



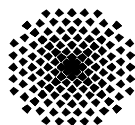
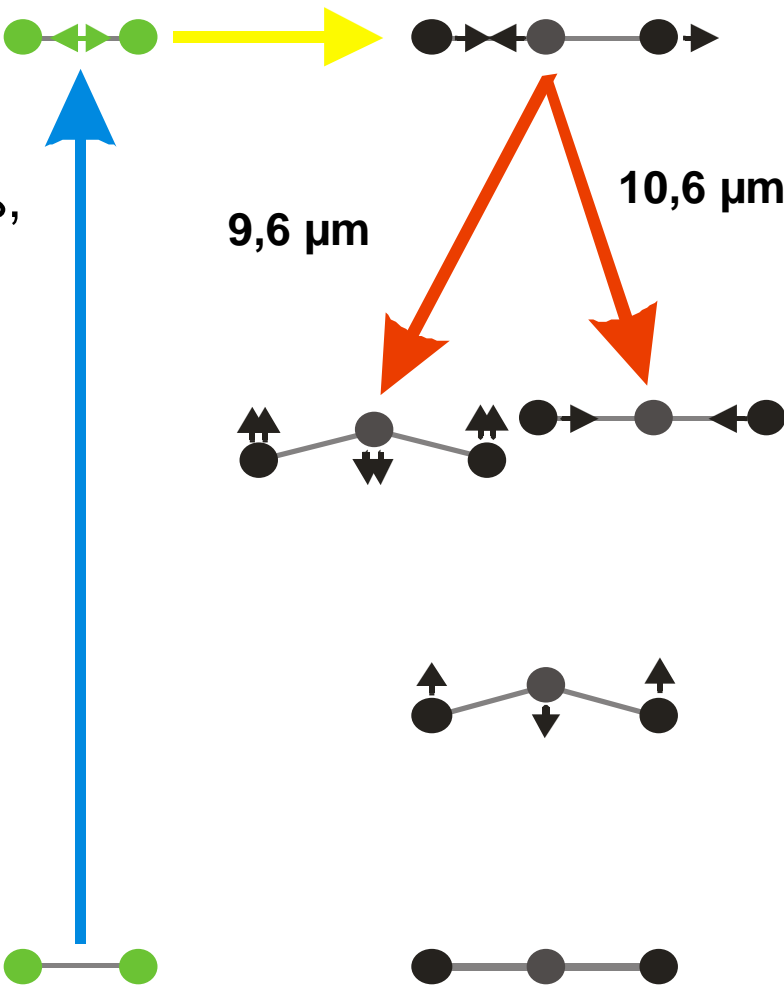
Elektrisch angeregter CO₂-Laser

Anregungsschema

Vibrationsanregung durch Elektronenstoß,
DC-Entladung; RF-Entladung

Energietransfer N₂ ⇒ CO₂
Laseremission 10,6 µm und 9,6 µm
Strahlungslose Relaxation in den
Grundzustand ⇒ Wärme

Vorteil von Gasen:
homogenes Brechungsindexprofil
Kühlung, z.B durch Gaskreislauf
oder Beimischung von He, möglich



Multispektrallaser am DLR Stuttgart

Elektronenstrahlgestützte Entladung

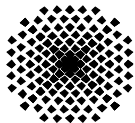
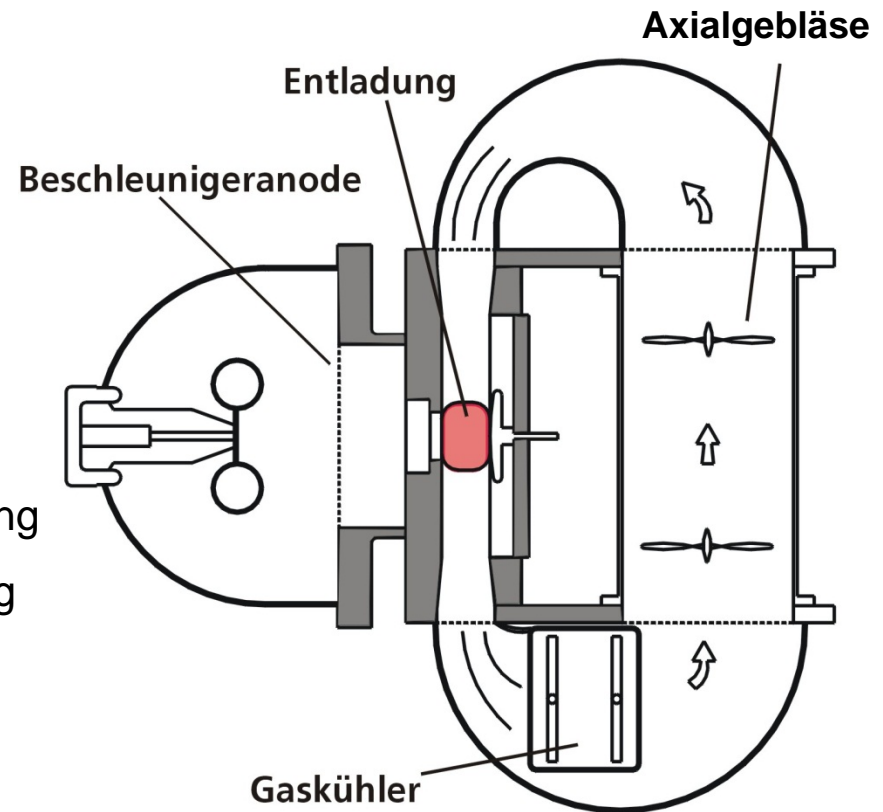
Elektronenstrahl 120 kV
➤ Vorionisation und Triggerung
Hauptentladung 20 – 50 kV
➤ Pulsenergie 25 – 450 J

Verfügbare Spektralbereiche

9,6 – 10,8 μm	CO ₂
4,9 – 6,8 μm	CO Grundschiwingung
2,5 – 3,4 μm	CO Oberschiwingung
1,7 μm	Ar-Xe

Kenndaten (CO₂)

Mittlere Leistung 10 kW
Pulszahl bis zu 1000
Pulsenergie 100 J @ 100 Hz
Pulslänge 2 – 12 μs

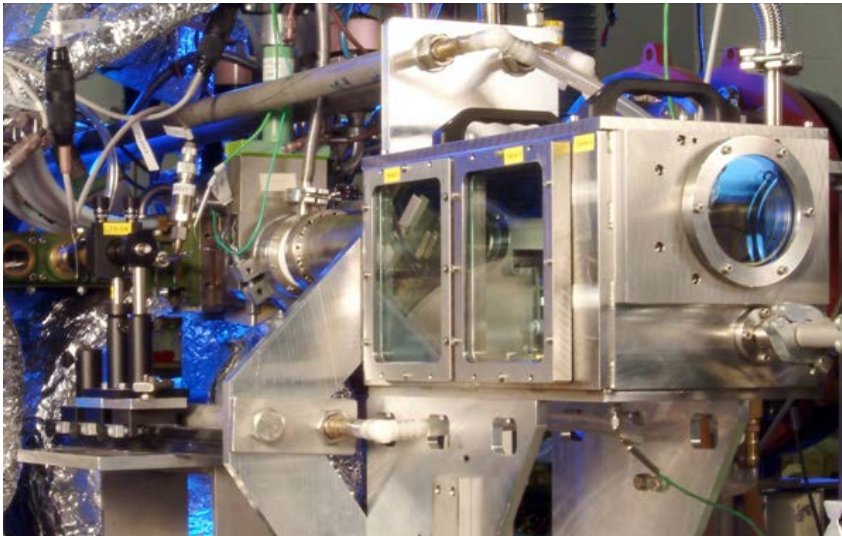


Universität
Stuttgart

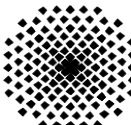
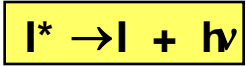
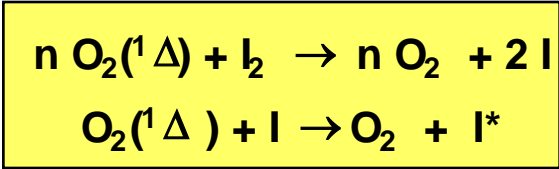
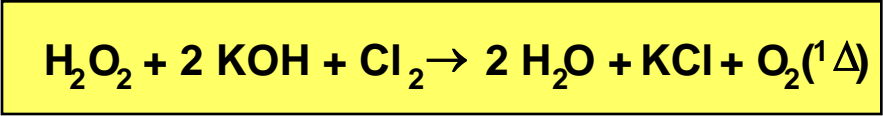
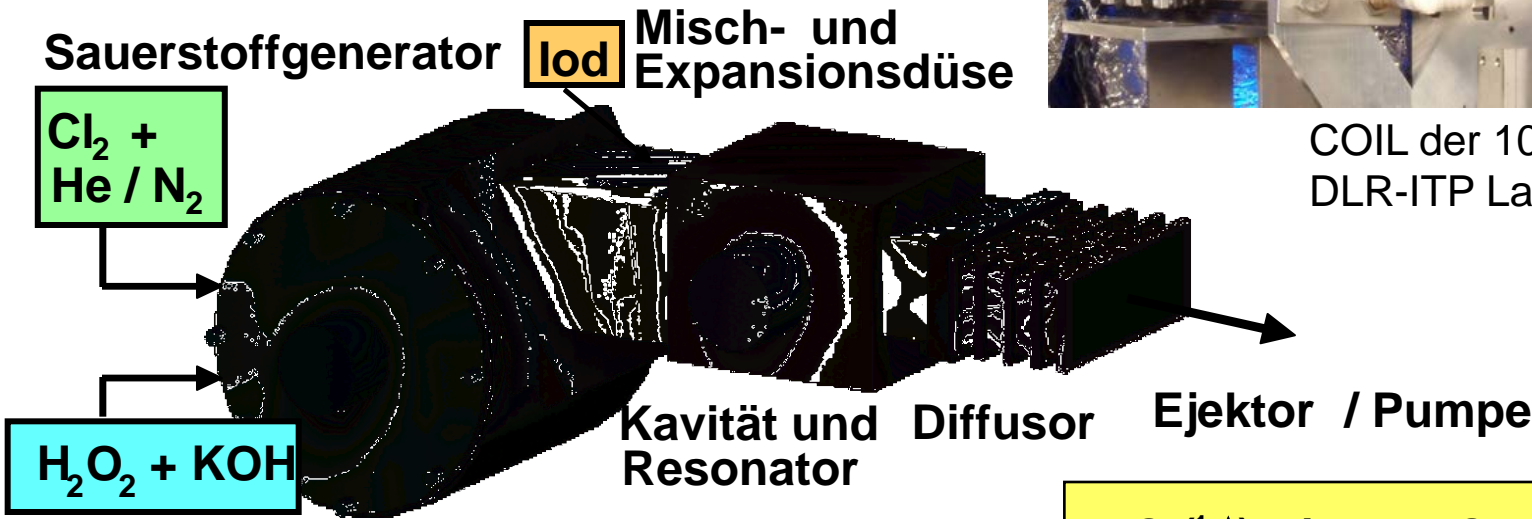
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



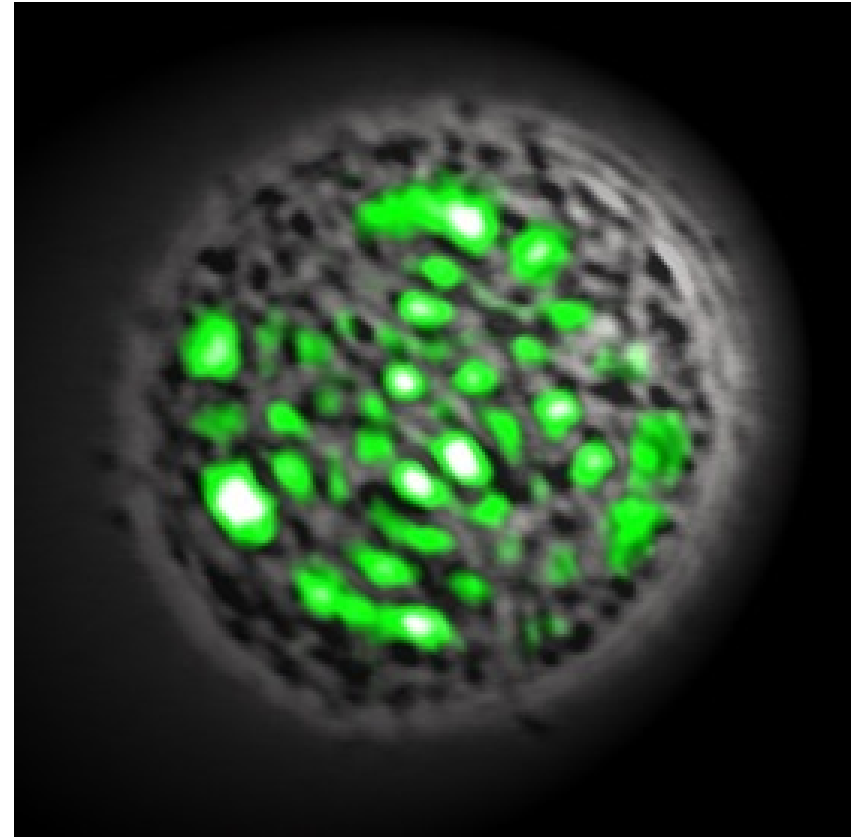
Chemischer Sauerstoff-Iod-Laser (COIL)



COIL der 10 kW-Klasse (cw)
DLR-ITP Lampoldshausen



„Biolaser“



Einzelne Zelle einer Qualle
im Resonatoraufbau

Pumpprozess:

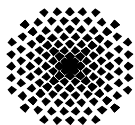
ns/nJ Pulse (blau)

Lasermedium GFP

(green fluorescent protein), $\lambda = 516 \text{ nm}$

Zelle lebt auch nach längerer Laseremission.

M.C. Gather et al, Single-cell biological lasers, Nature Photonics **5**, 406-410 (2011)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

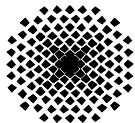
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > **2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung**
 - > 2.3.1 Fokussierbarkeit und Reichweite
 - > 2.3.2 Propagation

3 Antriebskonzepte

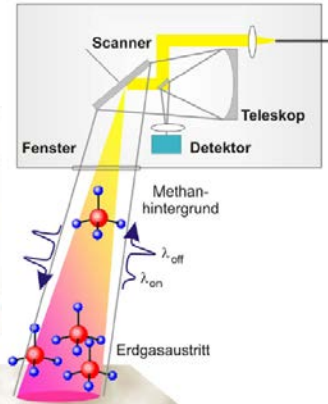
- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung



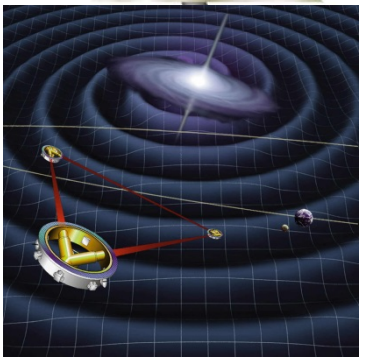
Eigenschaften

➤ Kohärentes Licht mit Gleichheit von
➤ Frequenz ➡ Spektroskopie



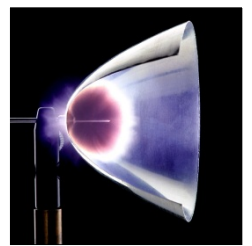
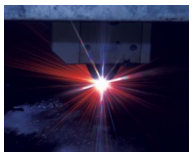
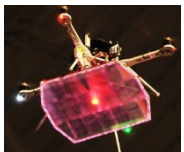
Bsp.: Detektion von
Lecks in Gasleitungen

➤ Phase ➡ Interferometrie

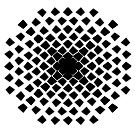


Bsp.: Detektion von
Gravitationswellen

➤ Richtung ➡ große Reichweite, gute Fokussierbarkeit



➤ Laserpulse ||||| hohe Intensitäten in kurzen Zeitskalen (μs – fs)
Kurzzeitdynamik



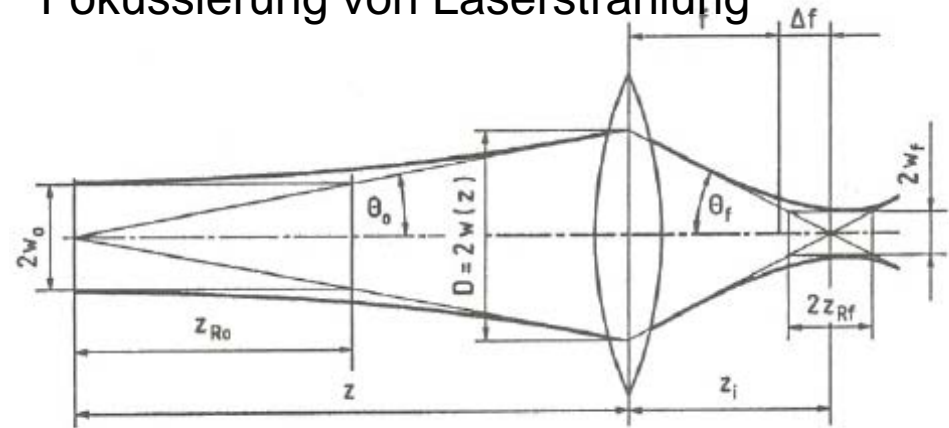
Fokussierbarkeit

Fokussierung von Sonnenlicht



Untergang der Römischen Flotte,
Hitzestrahle des Archimedes,
Syracus, 212 v. Chr.

Fokussierung von Laserstrahlung

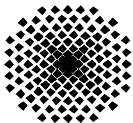


H. Hügel, Strahlwerkzeug Laser, Teubner-Verlag 1992, Stuttgart

Strahlparameterprodukt

$$w_0 \Theta_0 = w_f \Theta_f = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

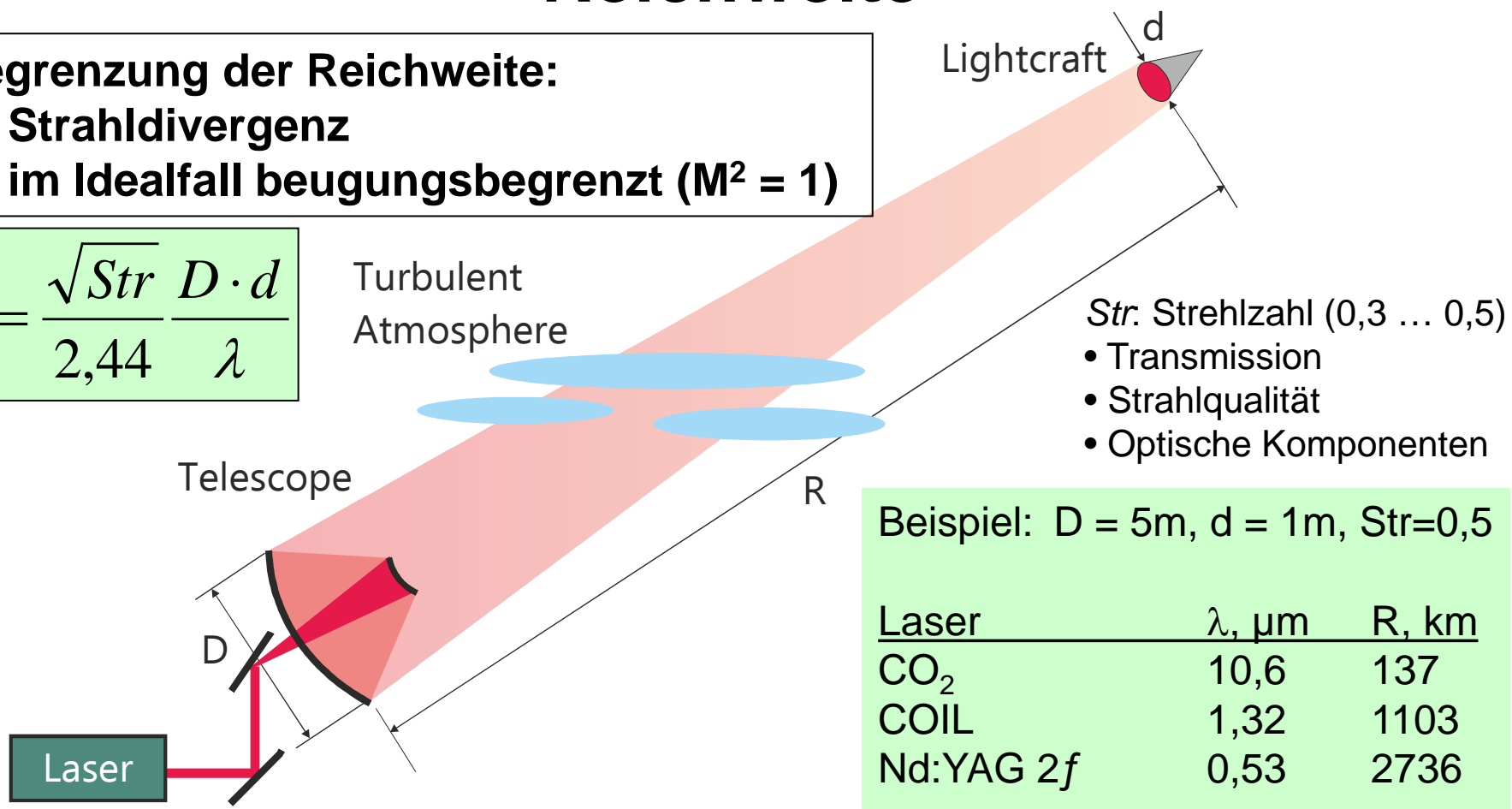
- w Strahltaile
- Θ Divergenzwinkel
- M^2 Strahlqualitätsparameter
- konstant bei Durchgang durch optische Elemente
- idealer Gaußstrahl: $M^2 = 1$
- sehr hohe Intensitäten möglich



Reichweite

- Begrenzung der Reichweite:
- Strahldivergenz
 - im Idealfall beugungsbegrenzt ($M^2 = 1$)

$$R = \frac{\sqrt{Str}}{2,44} \frac{D \cdot d}{\lambda}$$



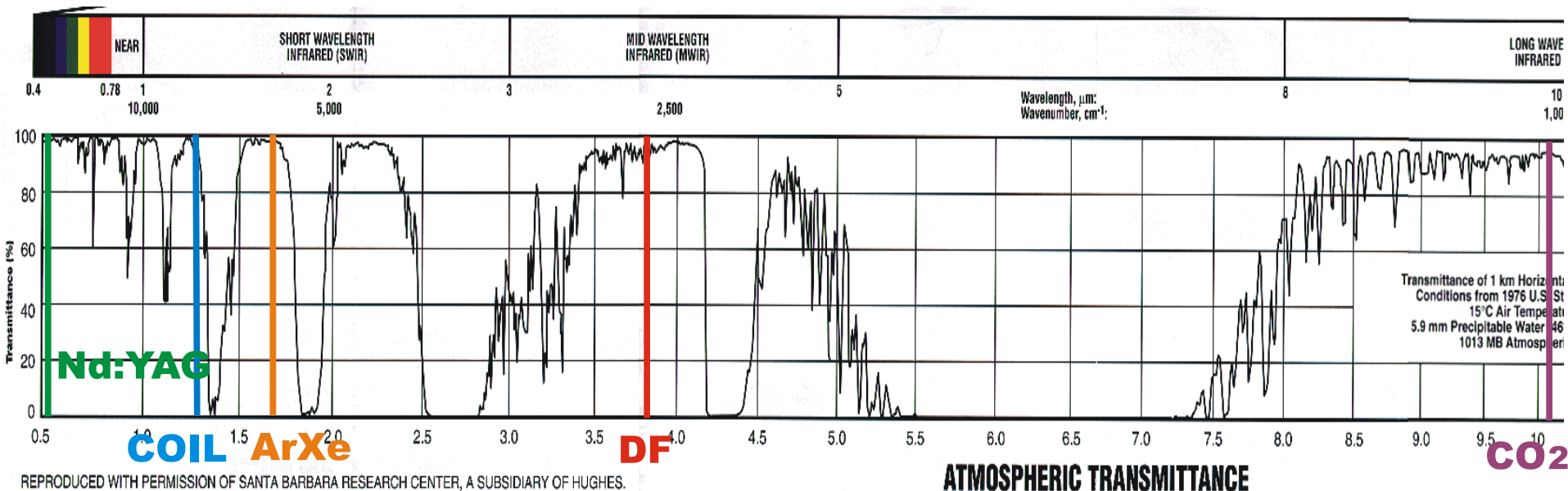
Beispiel: $D = 5\text{m}$, $d = 1\text{m}$, $Str=0,5$

Laser	λ , μm	R, km
CO ₂	10,6	137
COIL	1,32	1103
Nd:YAG 2f	0,53	2736

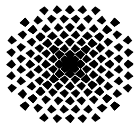
LEO: 350 ... 400 km Höhe
➡ 1000 km Reichweite

Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

Atmosphärische Transmission



- Streuung an Partikeln – wetterabhängig, größenabhängig
- Turbulenz
 - Strahlwanderung / -aufweitung
 - Modifikation der Fokussierung
 - insbesondere bei Erhitzung durch Absorption an Partikeln (Thermal Blooming)



Inhalt

1 Einleitung

2 Laser

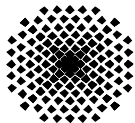
- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

> 3.1 Überblick

- > Systematik und Kenngrößen
- > Photonenantrieb
- > Photovoltaische Laserantriebe
- > Thermische Laserantriebe
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

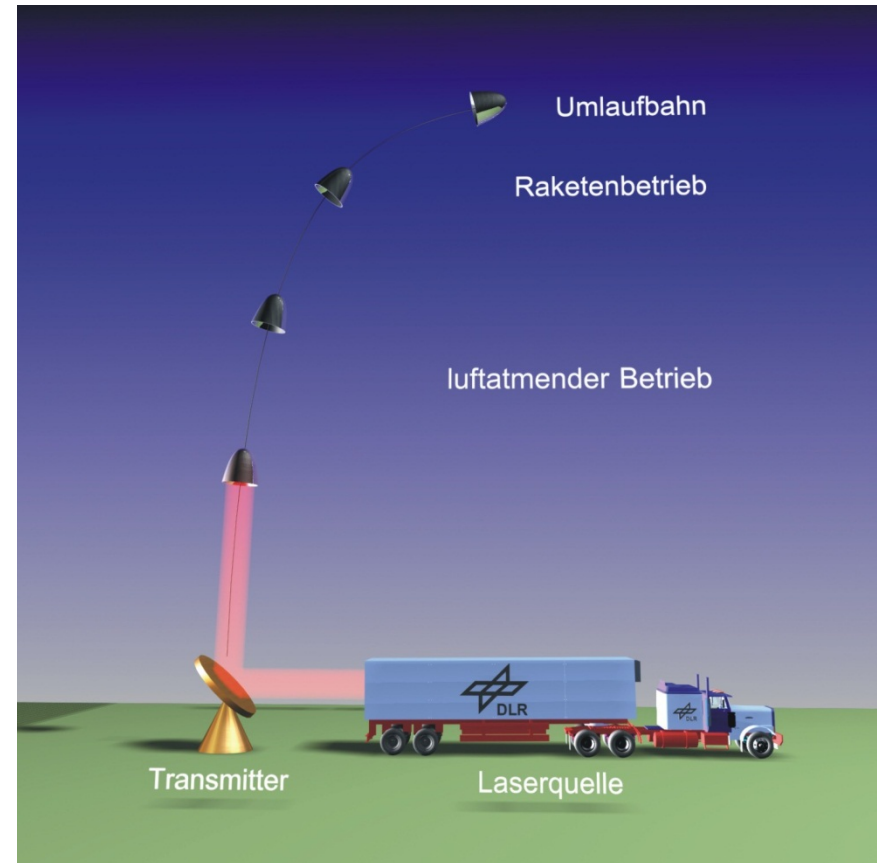
4 Zusammenfassung



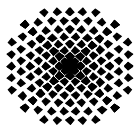
Antriebskonzepte

Arten der Wechselwirkung

- Reflektion – **Photonenantrieb**
- Absorption
– **Photovoltaische Laserantriebe**
- Erwärmung, Ionisierung
– **Thermische Laserantriebe**
 - Materialabtrag
– **Ablative Laserantriebe**
- Detonation und Verbrennung
– **Laser Lightcraft**



Laserbasierter Raketenantrieb



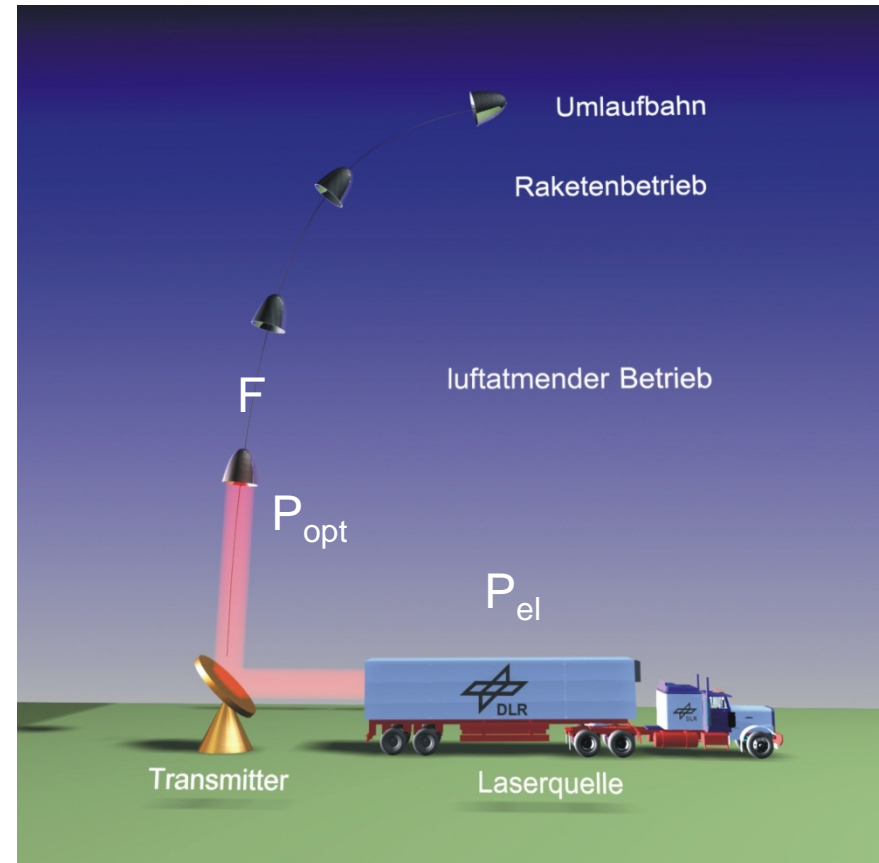
Schub-/Leistungsverhältnis

Impulskoppelkoeffizient (Antrieb):

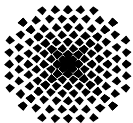
$$c_m = \frac{F}{P_{opt}} = \frac{\Delta p}{E_L}$$

Impulskoppelkoeffizient (System)

$$c_{m,sys} = \frac{F}{P_{el}} = \eta_{el-opt} \cdot c_m$$



Laserbasierter Raketenantrieb

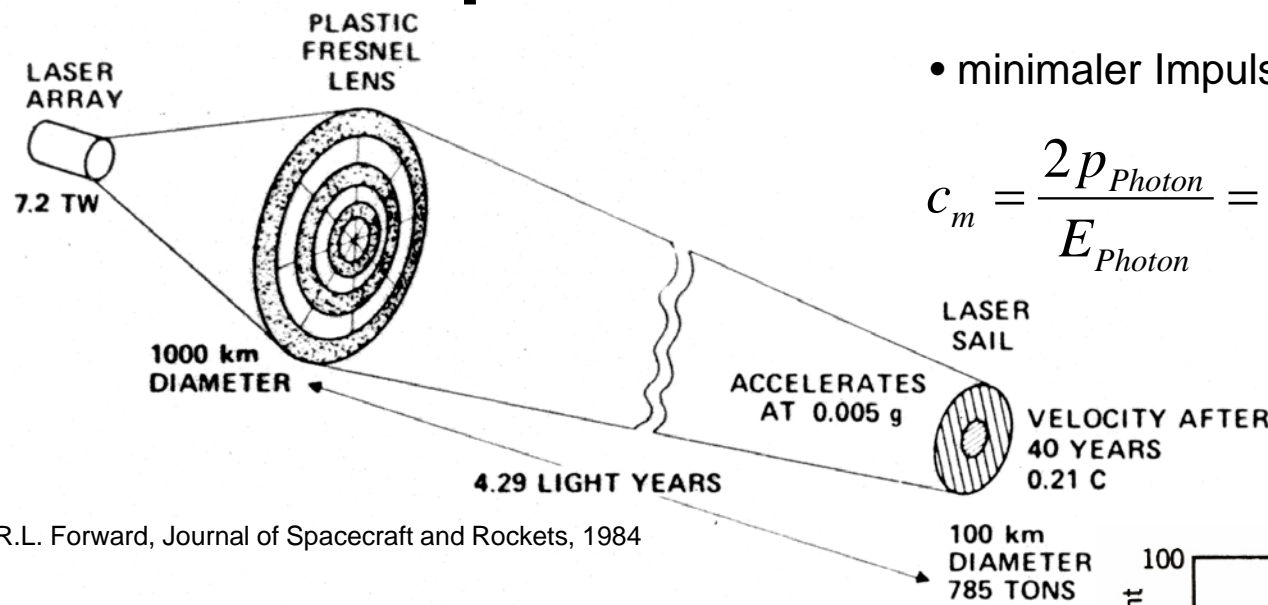


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzept für interstellare Missionen



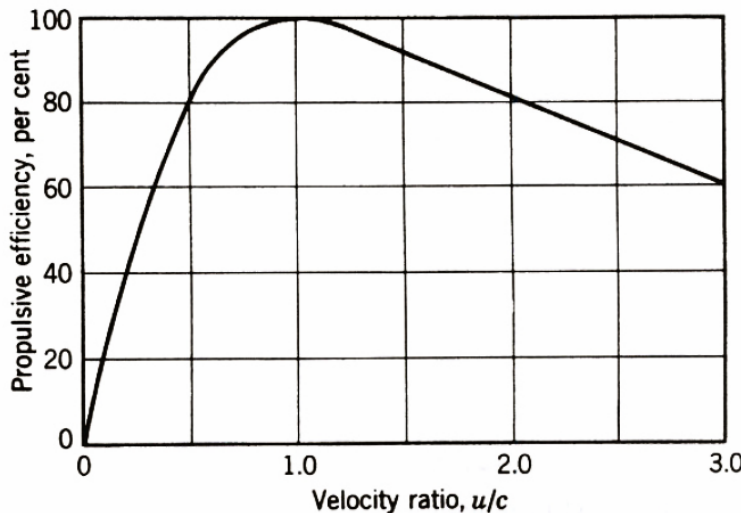
- minimaler Impulsübertrag (→ Mikroantriebe)

$$c_m = \frac{2p_{Photon}}{E_{Photon}} = \frac{2h\nu \cdot c^{-1}}{h\nu} = \frac{2}{c} = 6.7nN / W$$

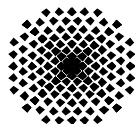
R.L. Forward, Journal of Spacecraft and Rockets, 1984

- hohe Effizienz bei relativistischen Geschwindigkeiten
Beispiel: $v=c/4$

$$\eta_{prop} = \frac{2v / v_{jet}}{1 + (v / v_{jet})^2} = \begin{cases} 47\% & (v_{jet} = c) \\ 0,03\% & (v_{jet} = 5 \text{ km/s}) \end{cases}$$



G.P. Sutton et al, Rocket Propulsion Elements (2001)

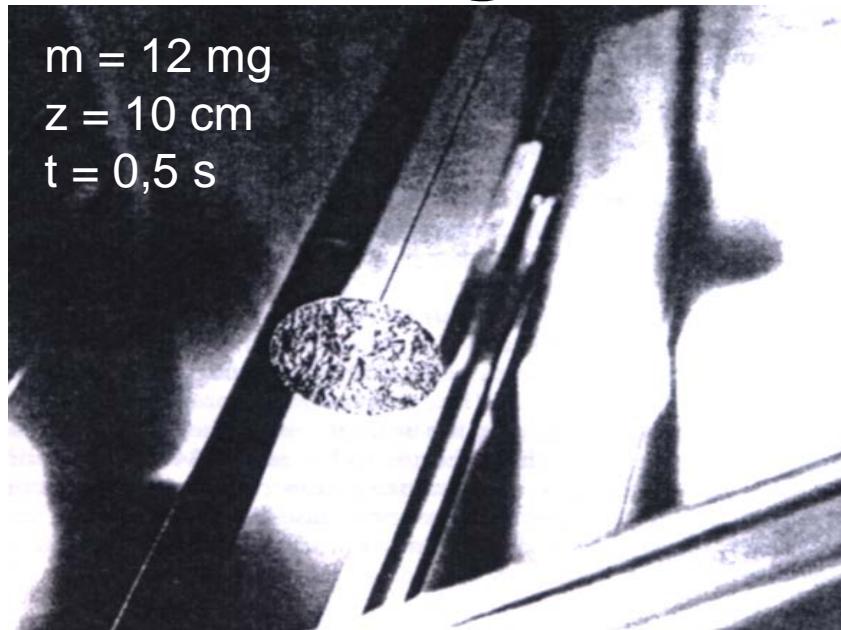


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

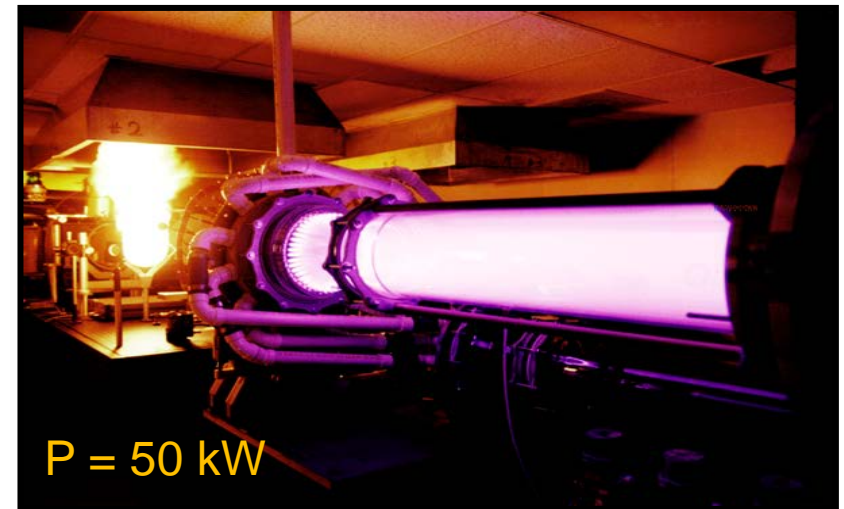


Lasersegel am Hochenergielaser

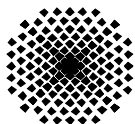


$m = 12 \text{ mg}$
 $z = 10 \text{ cm}$
 $t = 0,5 \text{ s}$

Myrabo et al, Laser-boosted light sail experiments with the 150-kW- LHMEI II CO₂ laser, Proc. SPIE **4760**, 774-798, (2002)



CO₂-Laser (cw)
Laser Hardened Materials Evaluation Laboratory
Wright Patterson Air Force Base



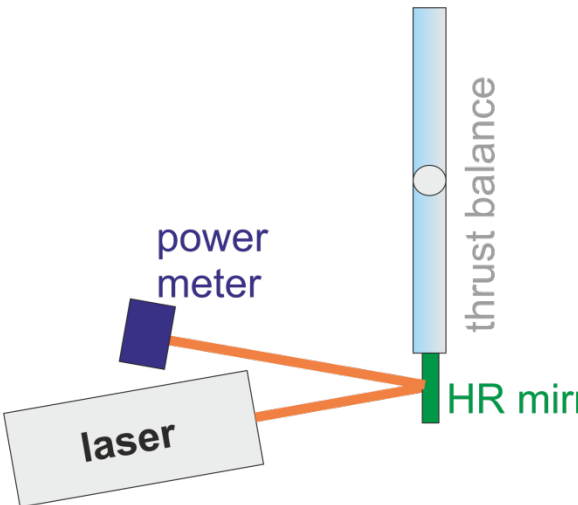
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Exkurs: Kalibration durch Photonendruck

Extra-cavity

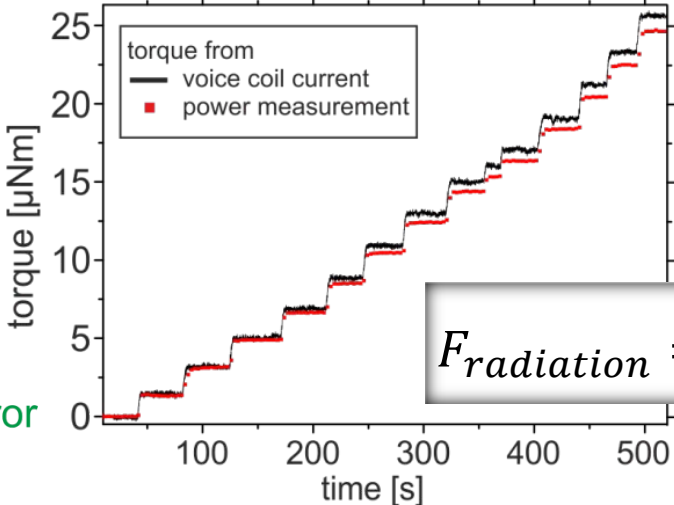


power meter

laser

thrust balance

HR mirror



torque from

- voice coil current
- power measurement

torque [μNm]

time [s]

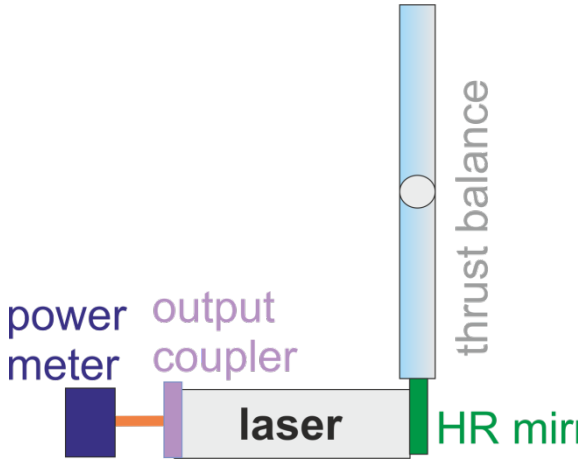
Laser: 1 kW Scheibenlaser

HR: Hochreflektierender Spiegel, $R = 99.98\%$

Einfallswinkel $\vartheta = 10^\circ$

$$F_{\text{radiation}} = (1 + R) \cdot \frac{P_{\text{ext}}}{c} \cdot \cos(\vartheta)$$

intra-cavity



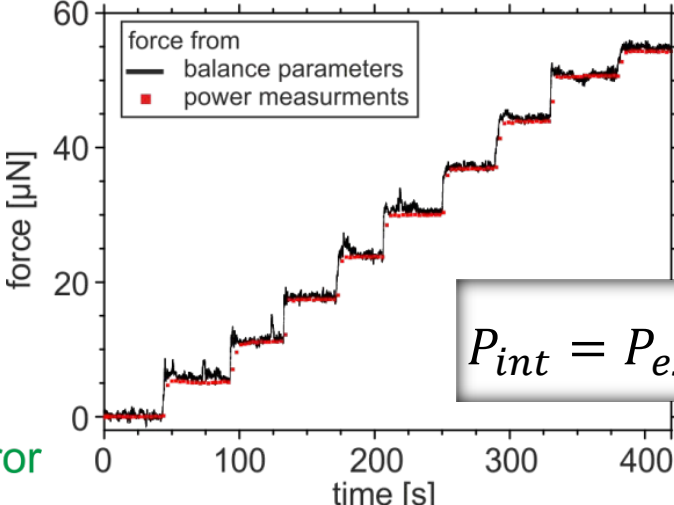
power meter

output coupler

laser

thrust balance

HR mirror



force from

- balance parameters
- power measurements

force [μN]

time [s]

HR-Spiegel = Endspiegel der Laserkavität

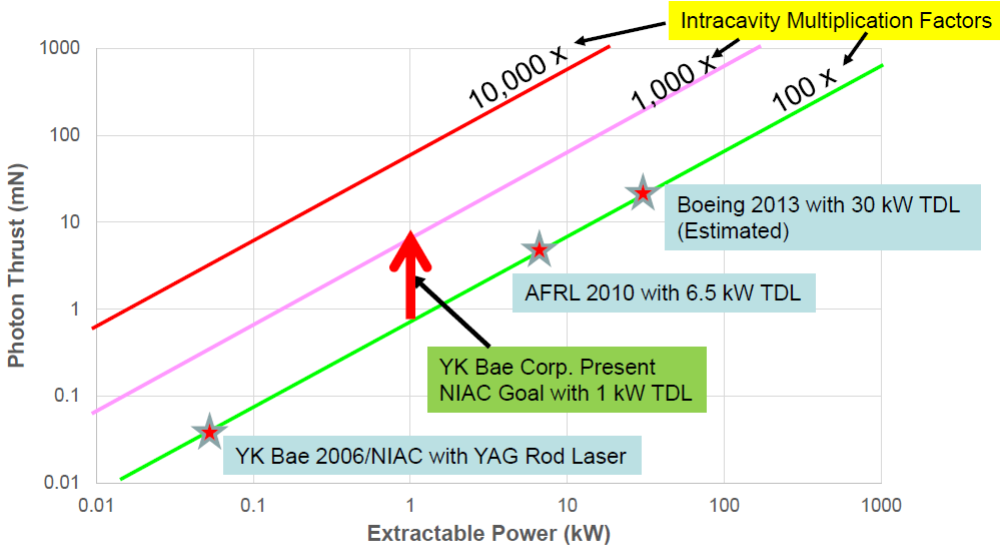
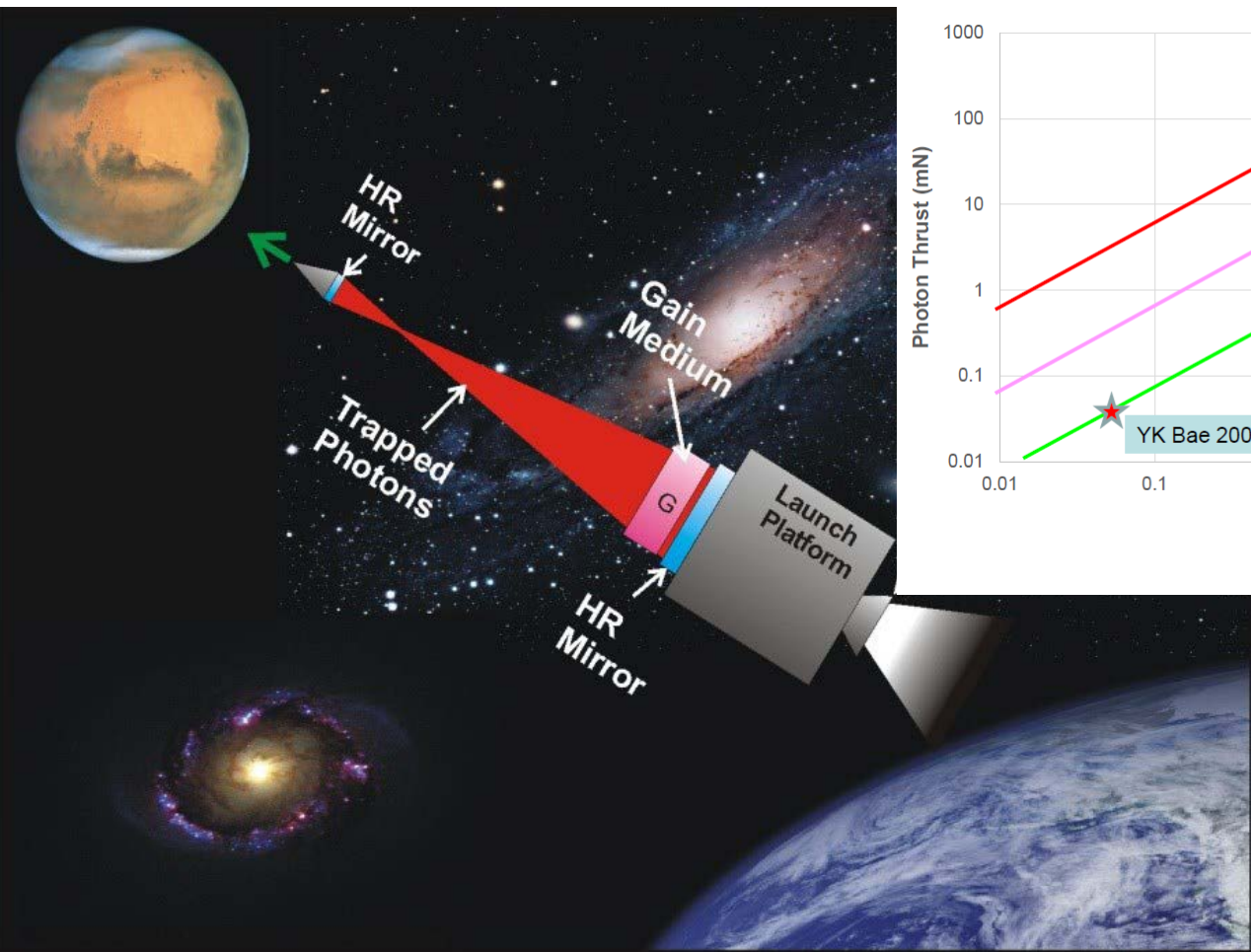
Auskoppelspiegel: $T = 2.4\%$

$\vartheta = 0^\circ$

$$P_{\text{int}} = P_{\text{ext}} \frac{1 - T}{T} \approx 41 \cdot P_{\text{ext}}$$

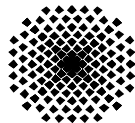
S. Karg et al., Laser Propulsion Research Facilities at DLR Stuttgart, Proceedings of HPLA/BEP 2014

Photonenantrieb – intra-cavity



TDL: Thin Disk Laser

Y.K.Bae, The Past, Present and Future of Photon Propulsion, Proceedings of HPLA/BEP 2014

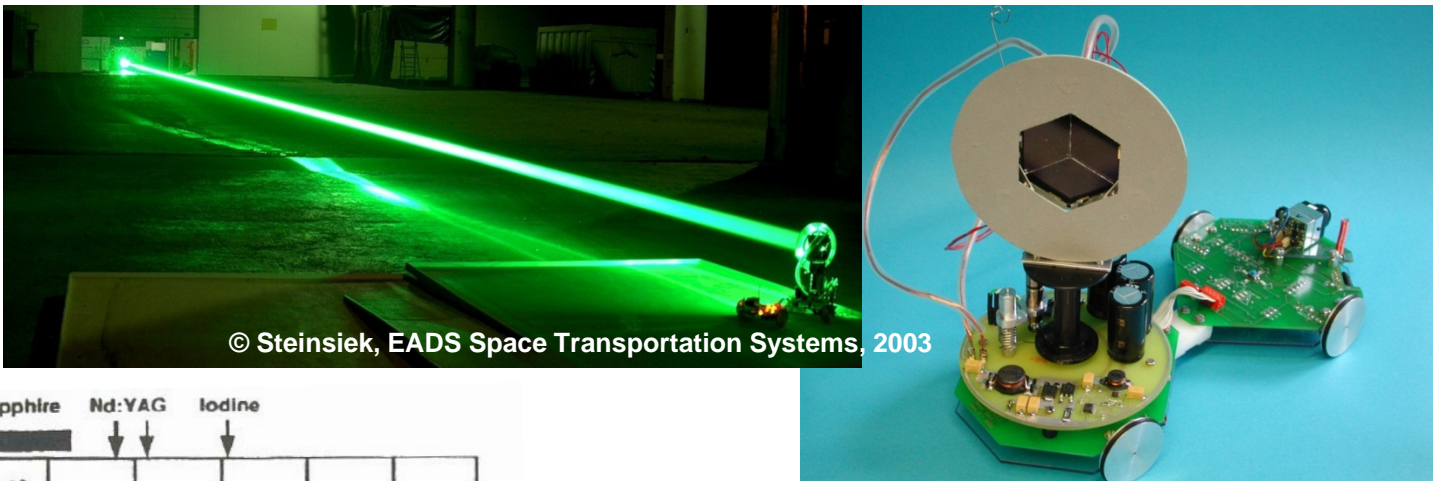


Universität
Stuttgart

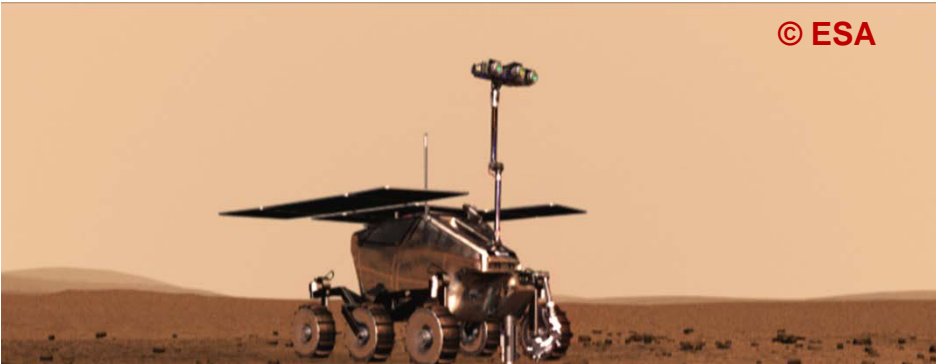
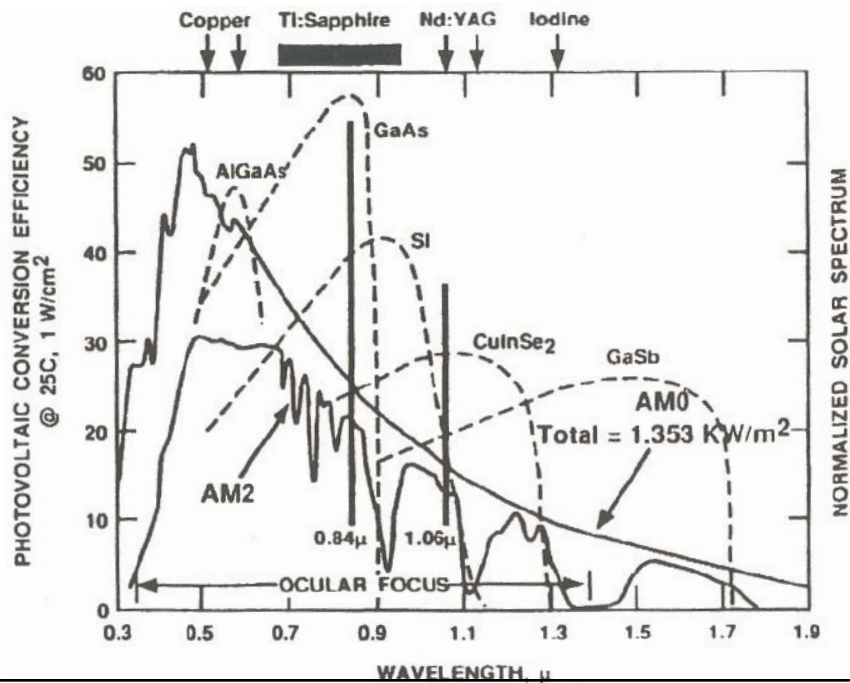
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Energieversorgung im Planetenschatten

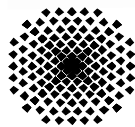


© Steinsiek, EADS Space Transportation Systems, 2003



© ESA

W.F. Krupke et al, DPAL: A new class of lasers for cw power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths, AIP Conf. Proc. **702**, 367-377 (2004)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



3 Antriebskonzepte > 3.1 Überblick > **3.1.3 Photovoltaische Laserantriebe**

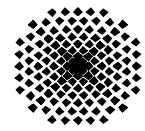
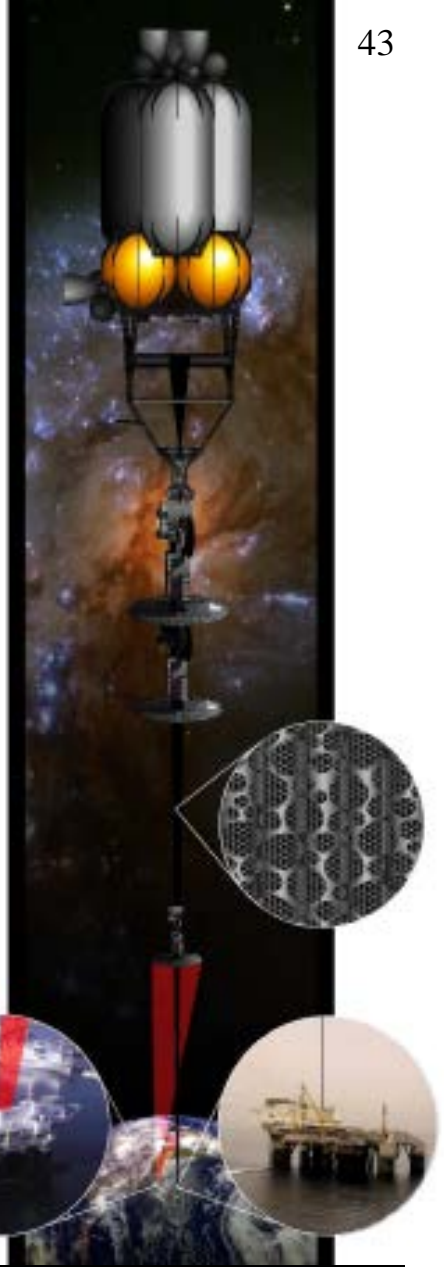
Space Elevator

$z = 1 \text{ km},$
 $v = 3,9 \text{ m/s}$



J.T. Kare et al, Laser Power Beaming on a Shoestring,
 AIP Conf. Proc. **997**, 97-108 (2008)

B.C. Edwards, The Space Elevator: an Ideal Application for the
 Free Electron Laser, Proc. SPIE **4632**, 134-140 (2002)

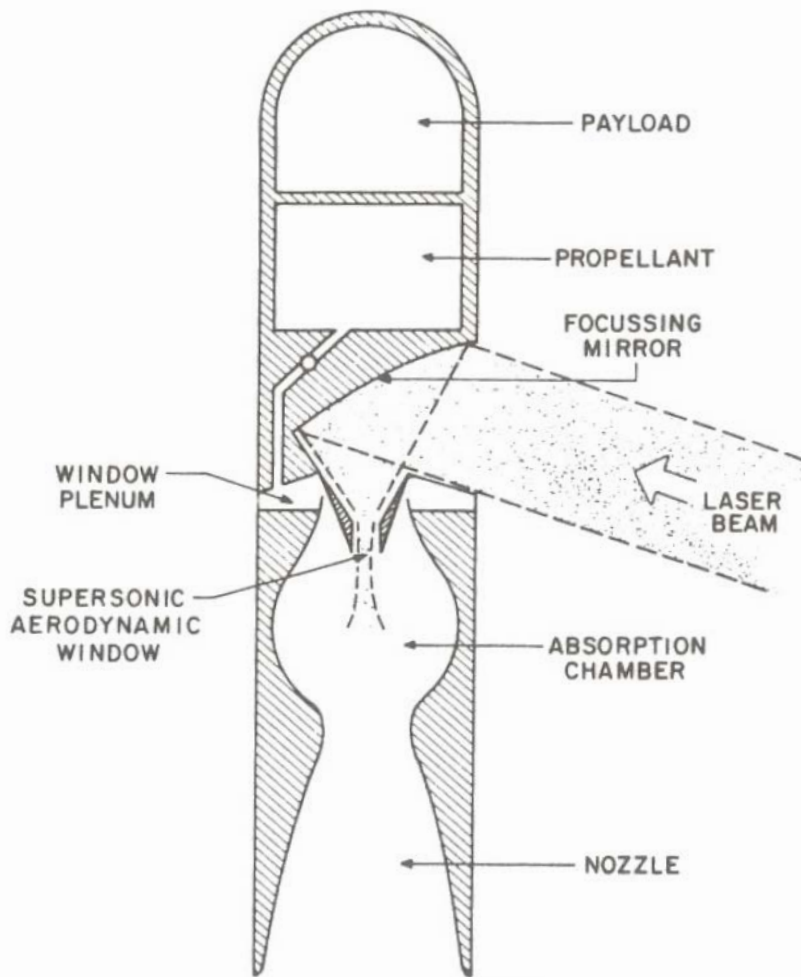


Universität
 Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Thermische Laserantriebe

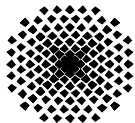


Funktionsprinzip:

- Aufheizen eines Treibstoffes durch fokussierten Laserstrahl
- Schub durch Expansion

Laserquelle: cw oder gepulst

R.F. Weiss et al., Laser Propulsion, Astronautics and Aeronautics, March 1979: 50 – 58



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Inhalt

1 Einleitung

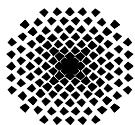
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

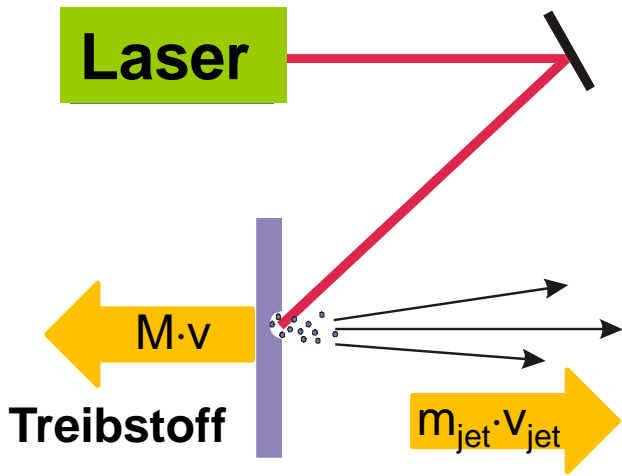
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > **3.2 Ablative Laserantriebe**
 - > 3.2.1 Antriebsprozess
 - > 3.2.2 Mikroantriebe USA
 - > 3.2.3 Mikroantrieb DLR
 - > 3.2.4 Hybride laser-el. Antriebe
 - > 3.2.5 Beseitigung von Weltraummüll
- > 3.3 Laser Lightcraft

4 Zusammenfassung

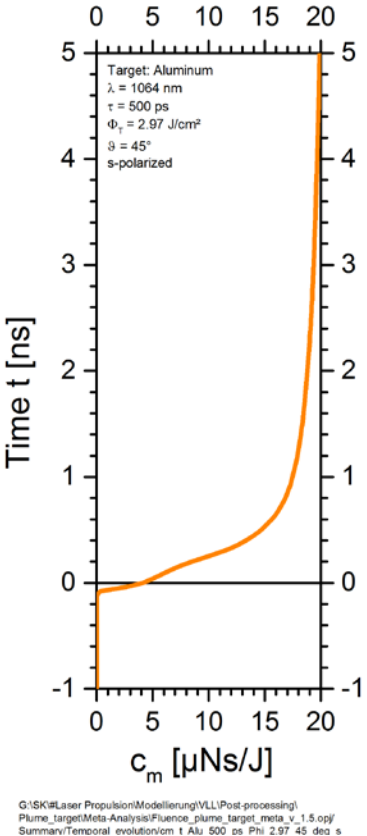
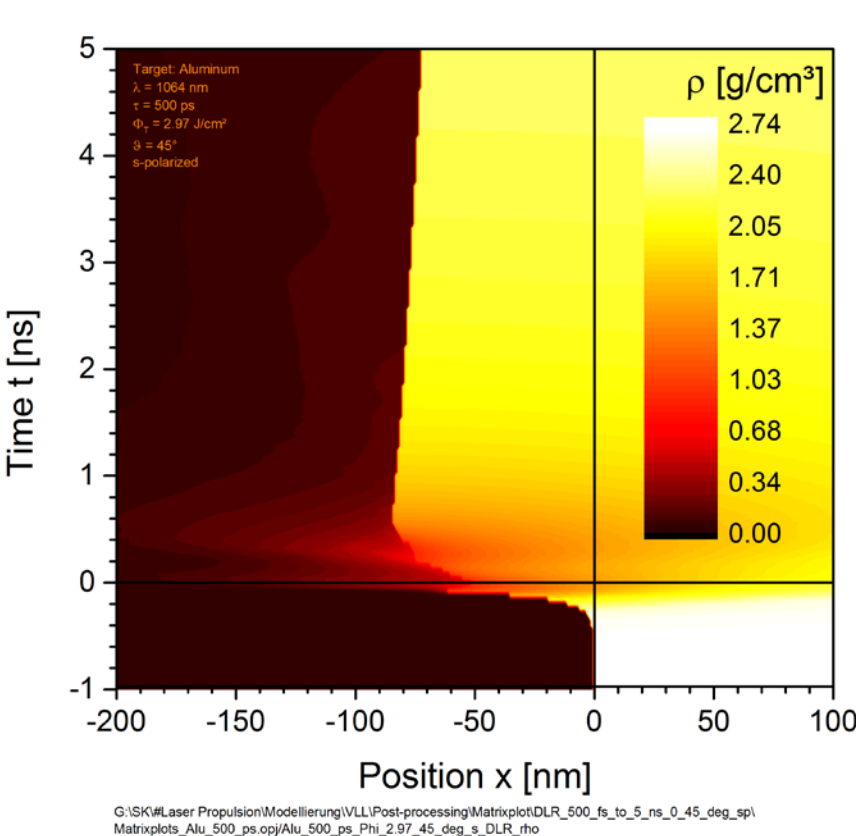


Laserinduzierter Ablationsprozess

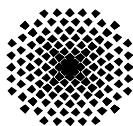


Laser Ablation

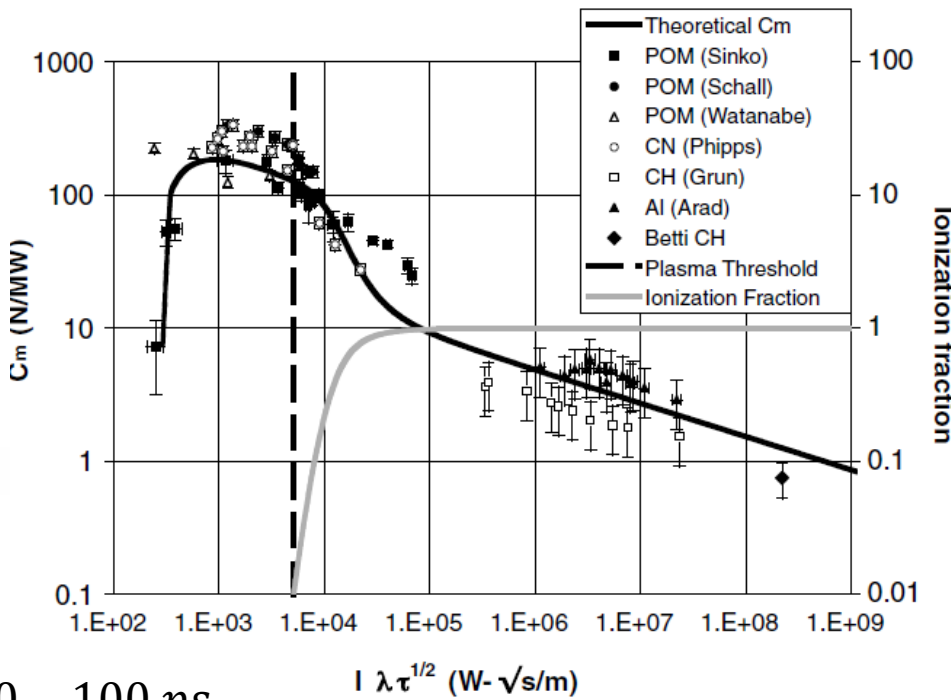
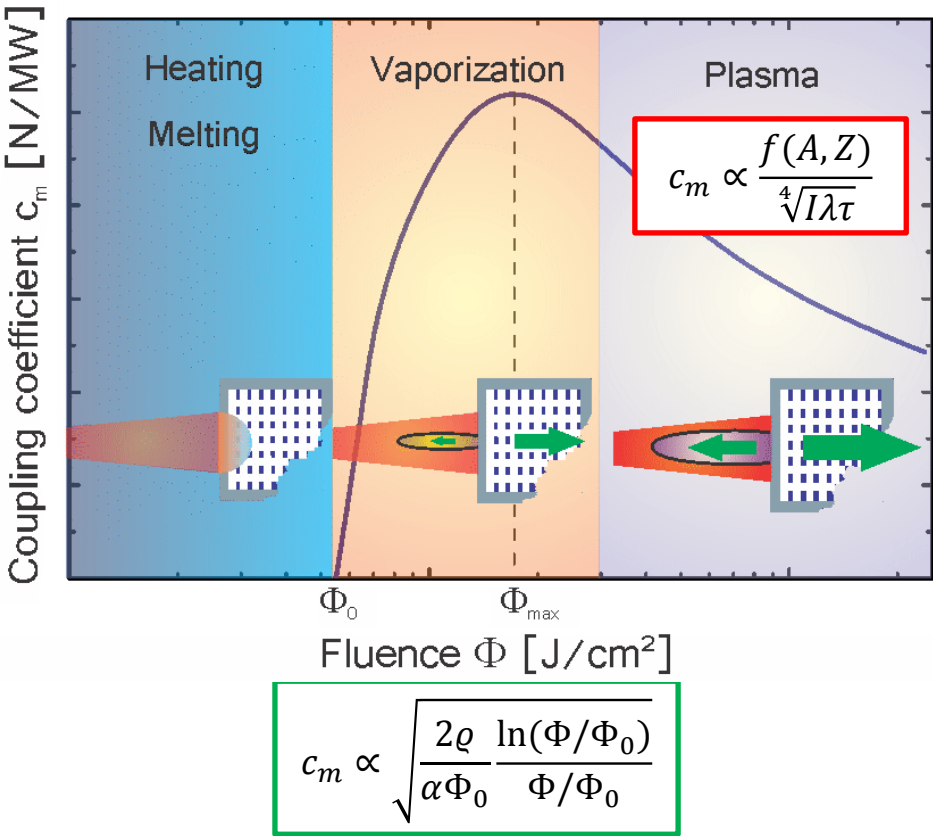
- Schmelzprozesse
- Verdampfung
- Ionisierung
- Plasmabildung
- Thermische Expansion
- Impulsübertrag



Hydrodynamische Simulationen mit Polly-2T (JIHT-RAS)

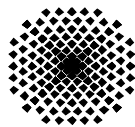


Impulskoppelkoeffizient



B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

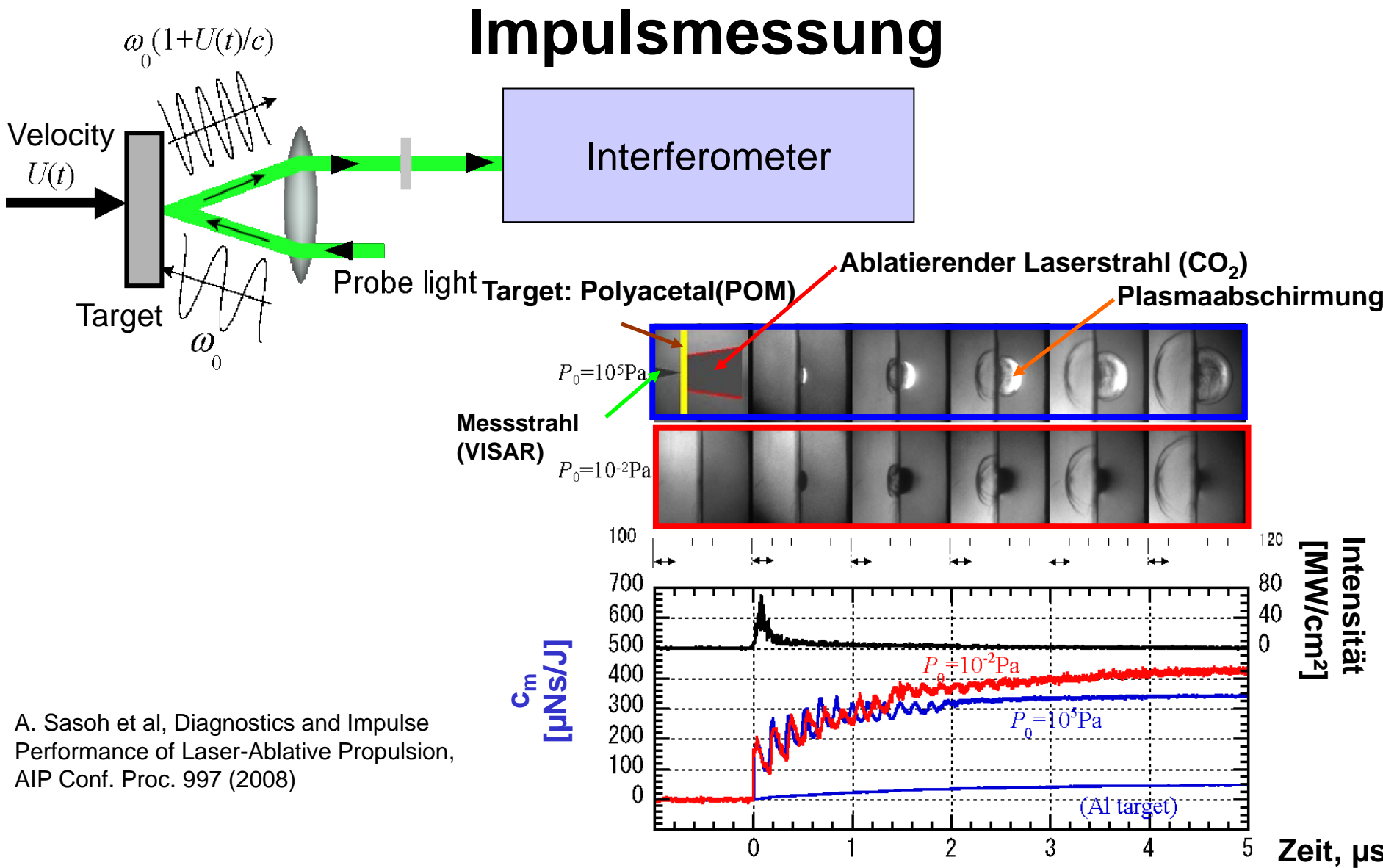
Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)



Universität
Stuttgart

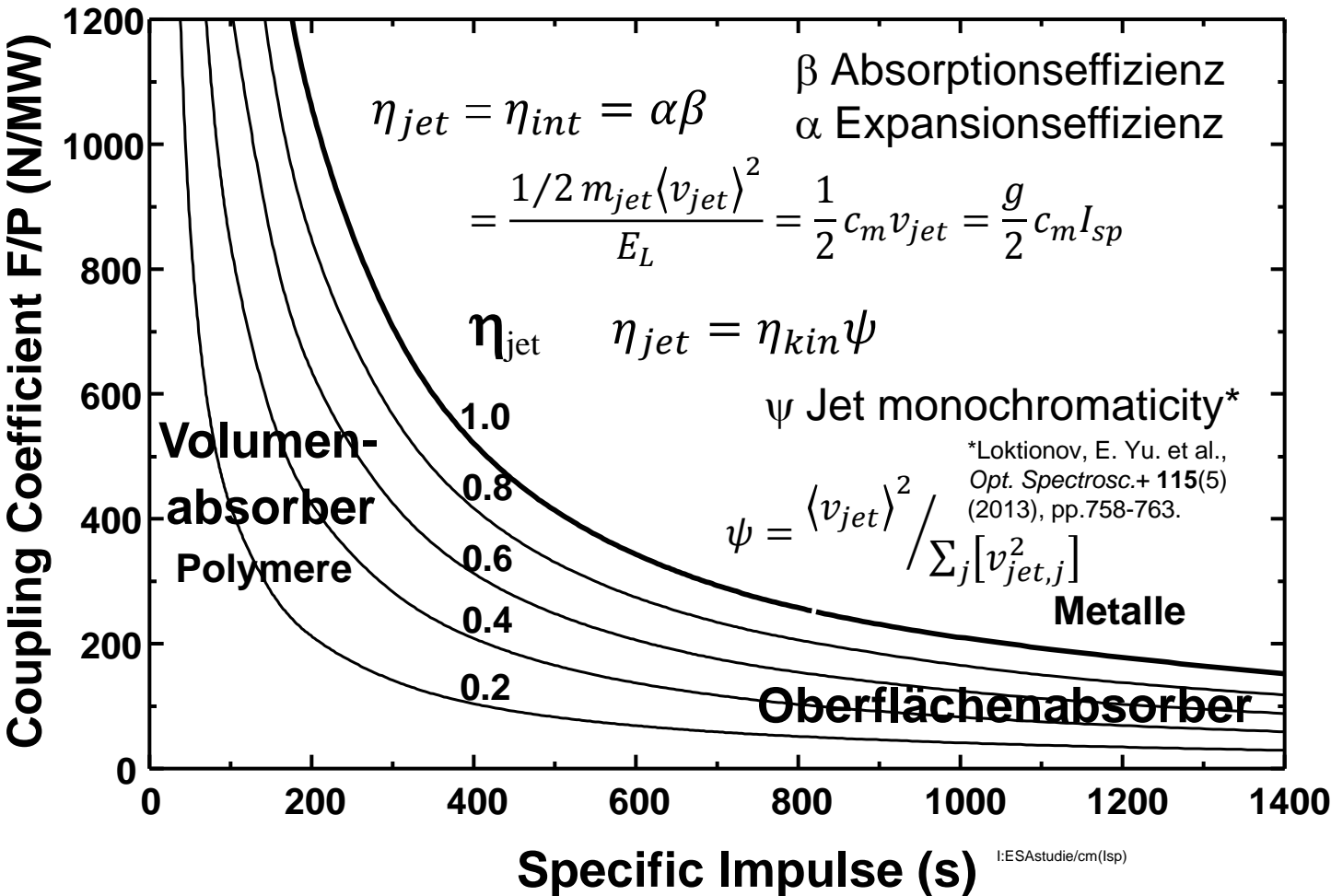
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de





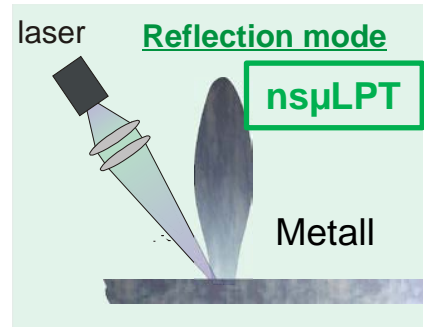
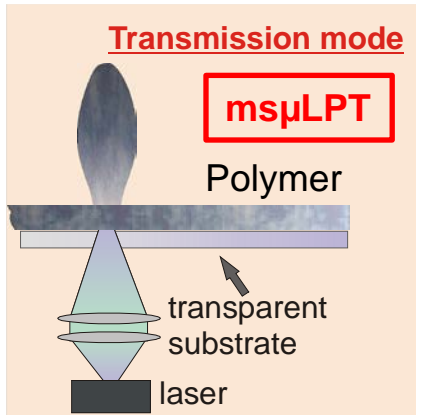
A. Sasoh et al, Diagnostics and Impulse Performance of Laser-Ablative Propulsion, AIP Conf. Proc. 997 (2008)

Innere Antriebseffizienz (Treibstoff-/Jeteffizienz)



Eckel, H.-A. and Schall, W. O., *Concept for a Laser Propulsion Based Nanosat Launch System*, ISBEP 2, AIP Conf. Proc. **702**, 263 – 273 (2003)

Konzepte

Antrieb	Masse [kg]	Min.Impulsbit [μNs]	I _{sp} [s]	C _{m,sys} [μN/W _{el}]	T [μN]
 nsμLPT	0,8	4·10 ⁻⁵	3000	40	100
 mspμLPT	0,5	0,05	250	550	10000
Vergleich:					
μPPT	1,0	2	1000	20	30
FEEP	8,7	1	9000	15	1400

Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)

T-Mode Micro Laser Plasma Thruster (msμLPT)

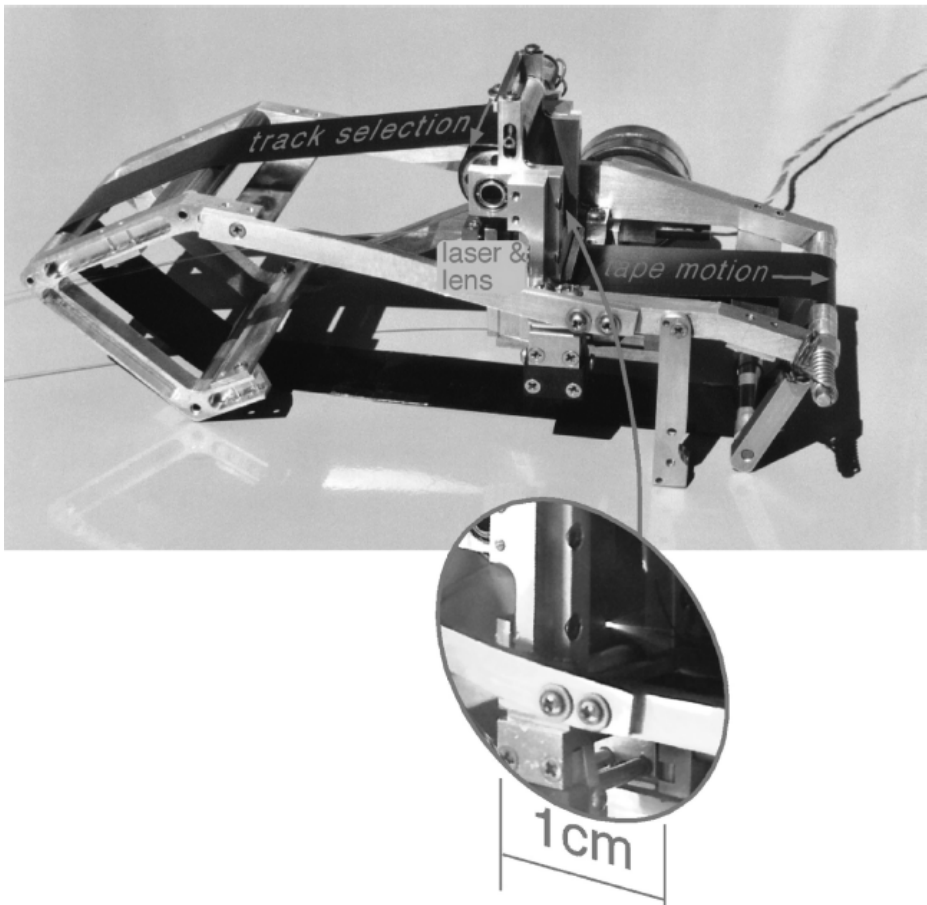
Getestete Treibstoffe:

PVC, sowie exotherme Polymere (C-dotiert)

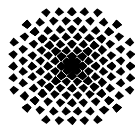
T	0,14 ... 0,29 mN (PVC:C) 2,8 ... 7,2 mN (EP:C I)
c_m	60 ... 120 $\mu\text{N/W}$ (PVC:C) 1170 ... 3000 $\mu\text{N/W}$ (EP:C)
I_{sp}	650 ... 750 s (PVC:C) 160 ... 540 s (EP:C)

Lasertyp: Diodenlaser

τ	2 ms
λ	920 nm
f_{rep}	80 Hz
E_L	30 mJ



Phipps et al, Micropropulsion using a Laser Ablation Jet, J. Prop. Pow. **20(6)**, 1000-1011 (2004)
Phipps et al, Performance Test Results for the Laser-Powered Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 224-234 (2006)



R-Mode Micro Laser Plasma Thruster (nsμLPT)

Getestete Treibstoffe:

Aluminium, Gold

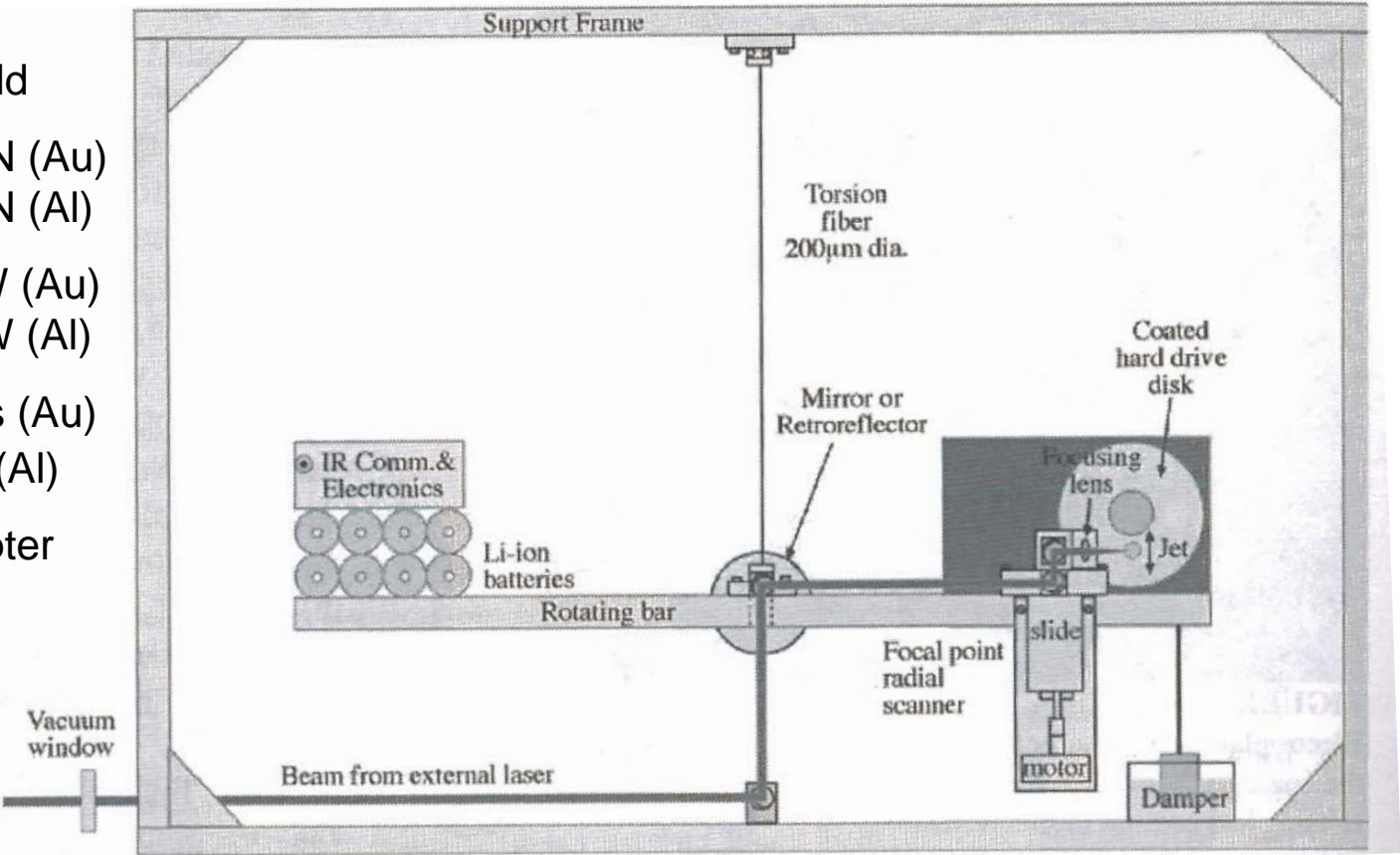
T 0,47 ... 0,63 μN (Au)
0,94 ... 1,88 μN (Al)

c_m 7,2 ... 68 $\mu\text{N/W}$ (Au)
32 ... 111 $\mu\text{N/W}$ (Al)

I_{sp} 3664 ... 7905 s (Au)
822 ... 6610 s (Al)

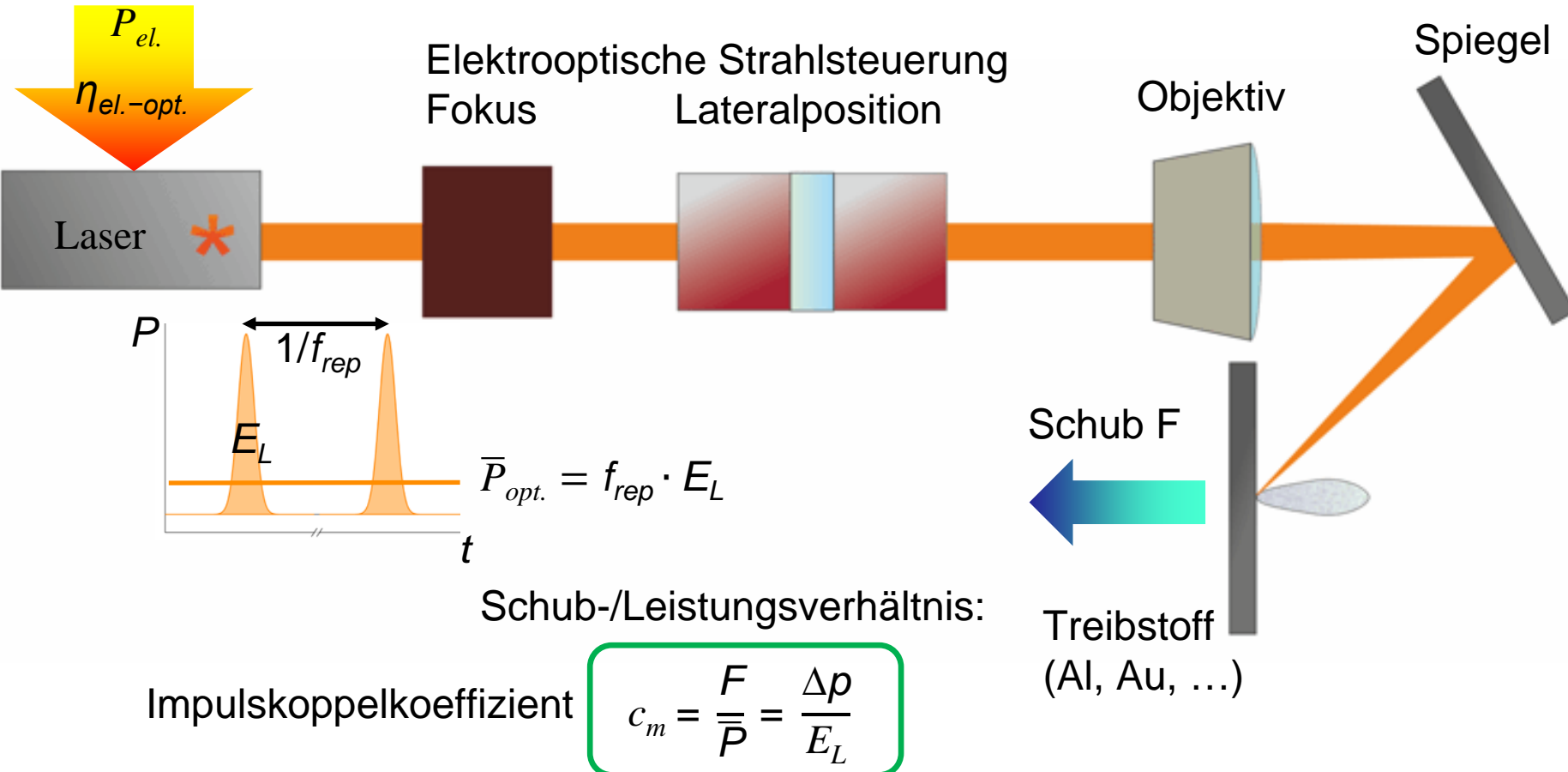
Lasertyp: Diodengepumpter
Nd:YAG-Laser

τ 5 ns
 λ 1064 nm
 f_{rep} 10 Hz
 E_L 1 ... 20 mJ



Phipps et al, A ns-Pulse Laser Microthruster, AIP Conf. Proc. **830**, 235-246 (2006)

Trägheitsfreies Antriebskonzept

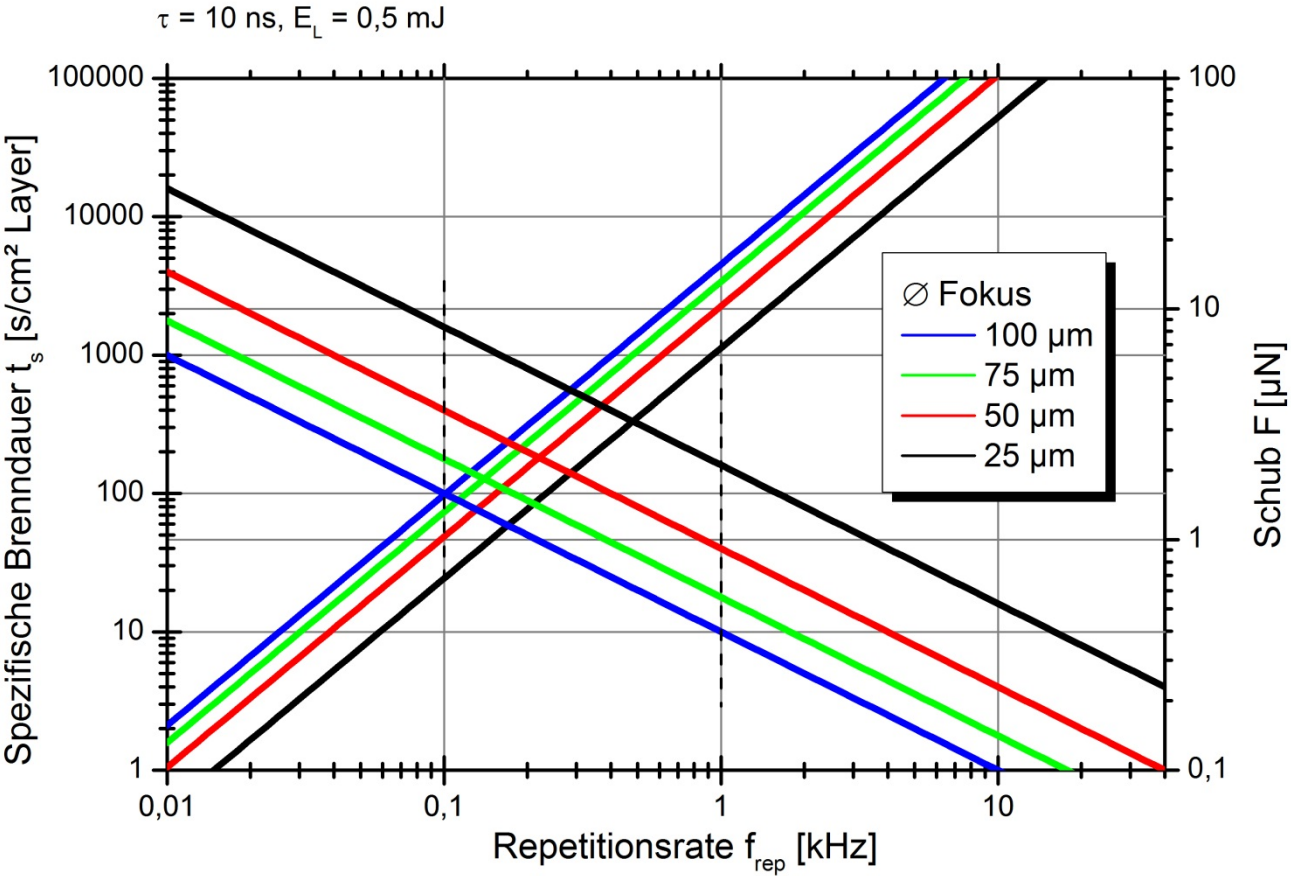


Eckel et al, *Tailoring Laser Propulsion for Future Applications in Space*, High Power Laser Ablation 2010, AIP Conf. Proc. **1278**, 677-688 (2010)

Schubcharakteristik



Stablaser
 $\bar{P}_{max} = 35\text{ W}$

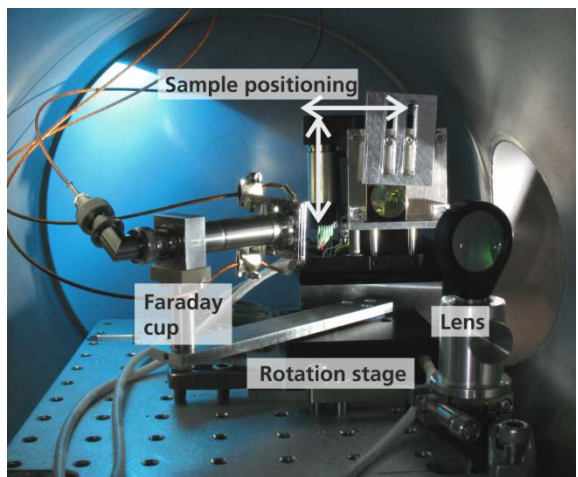


Modellrechnung mit experimentellen Werten aus
Phipps et al, Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers,
J. Appl. Phys. 64(3), 1083-1096 (1988)

Aktuelle Forschung am DLR

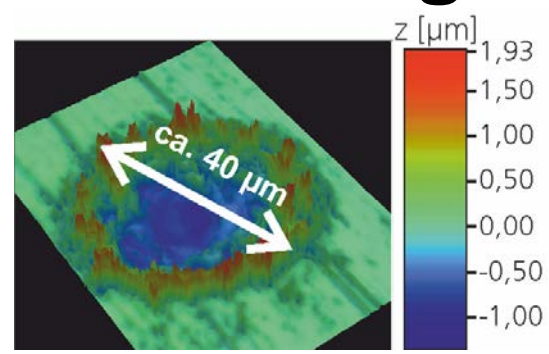


Elektrooptische Strahlsteuerung

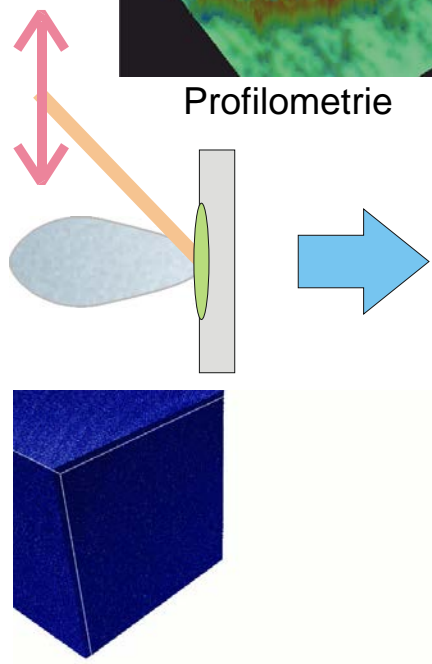


Treibstrahldiagnostik:
Faraday-Becher
Plasmaspektroskopie

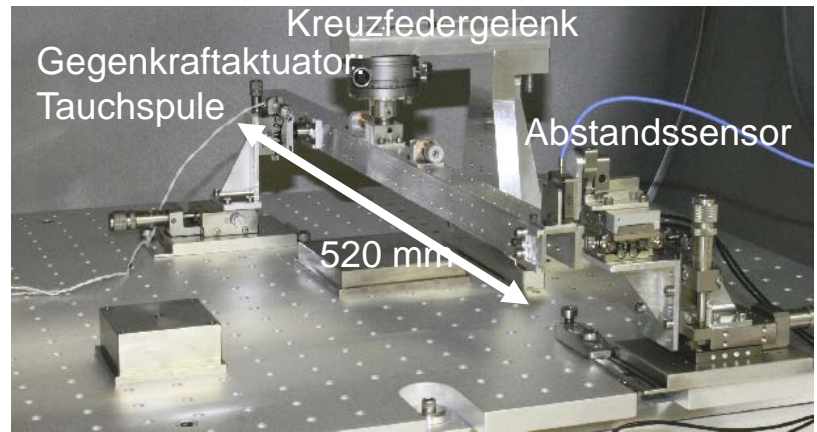
Ablationsprozess:
Molekulardynamik (IMD) / Hydrodynamik (Polly-2T)
Plasmajet: DSMC-PIC-Simulation (PICLas)



Profilometrie



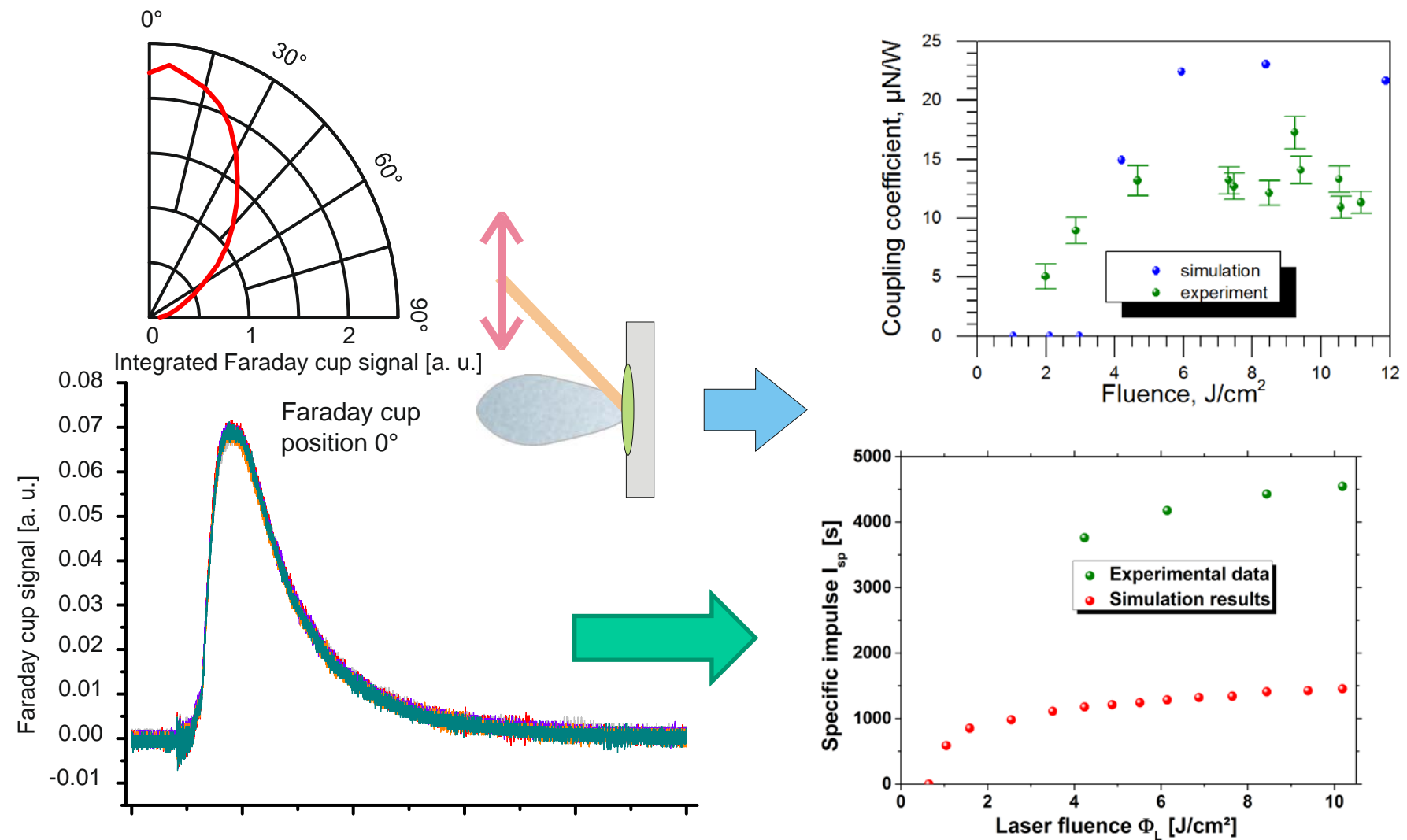
- Kenngroßen:**
- Impulsübertrag
 - Ablatierte Masse
 - Oberflächenqualität
 - Jet: Geschwindigkeitsverteilung
 - Divergenz



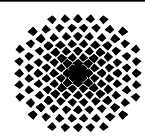
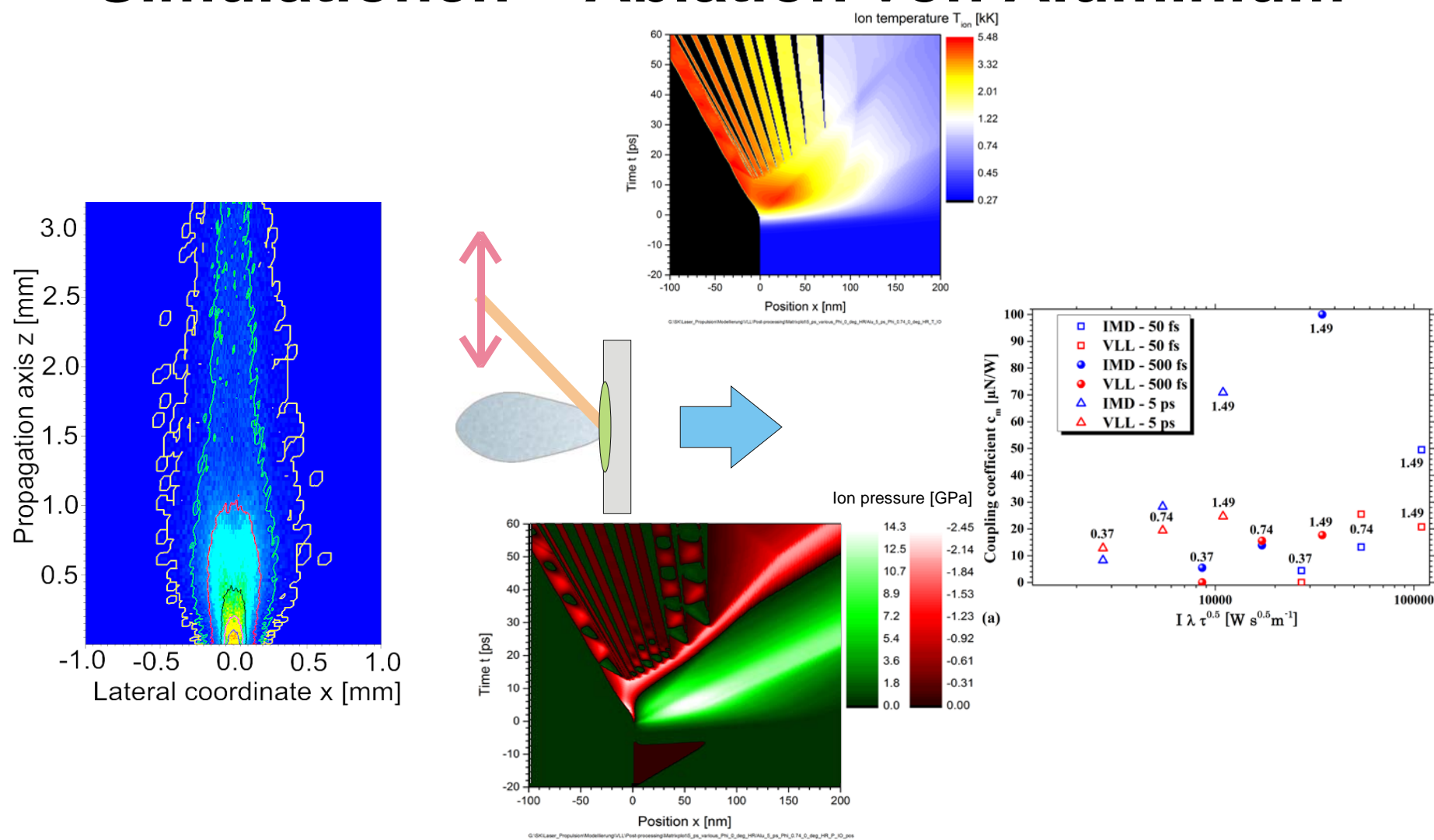
µN-Schubwaage (Torsionspendel)

- Optimierungsparameter:**
- Pulsdauer, -profil
 - Wellenlänge
 - Ablationsschema
 - Material

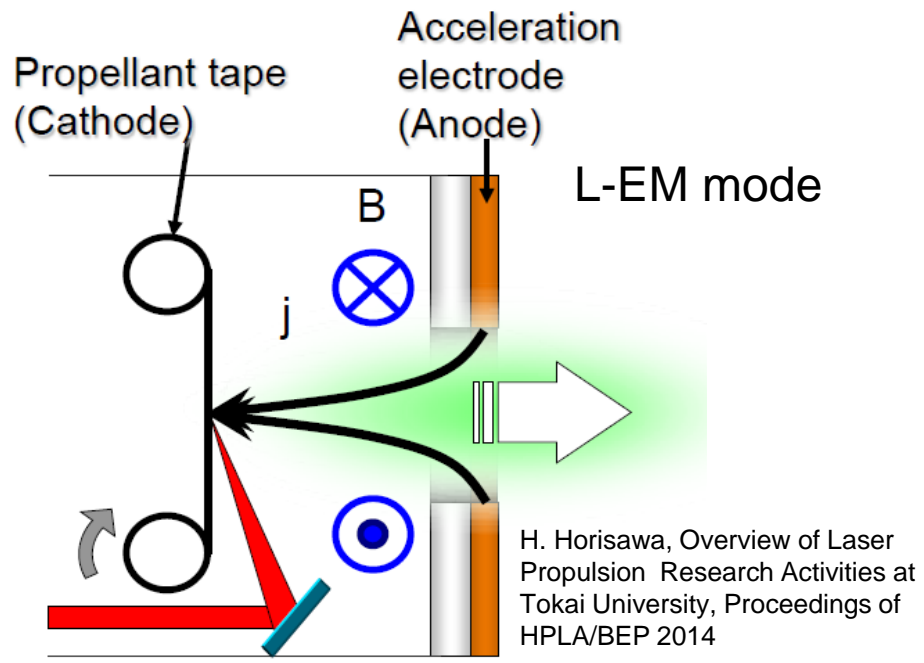
Experimente – Ablation von Aluminium



Simulationen – Ablation von Aluminium



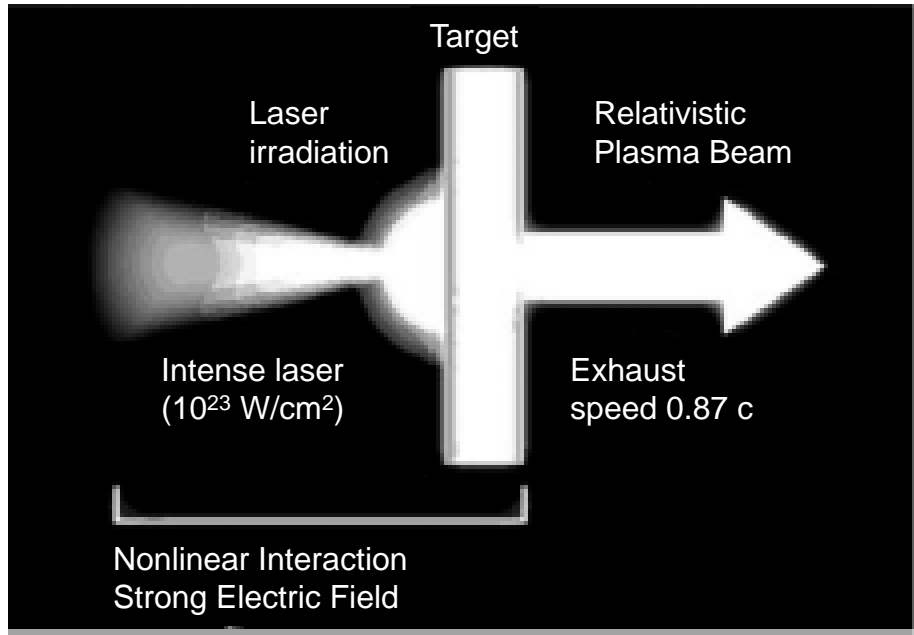
Antriebskonzepte



elektrostatisch (L-ES mode)

+ *el. Entladung: elektrothermisch (LT mode)*

+ *große Stromstärken:*
elektromagnetisch durch Selbstinduktion
(L-EM mode)



relativistisch

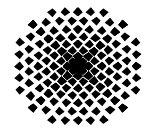
Pulsdauer: 10 fs ... 5 ps

Schichtdicke: ~ 100 nm

Coulomb-Explosion

- Erzeugung hochenergetischer Elektronen
- Aufbau eines elektrischen Feldes
- Expansion der Ionen in Plasmastrahl

Phipps et al, Review: Laser-Ablation Propulsion, J. Prop. Pow. **26(4)**, 609-637 (2010)

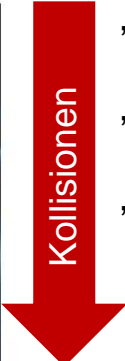


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Bedrohung durch Weltraummüll

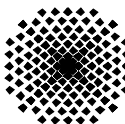


- Größenordnungen letaler Objekte:
- „Autos“ – 1%
einfaches Tracking und Ausweichen
 - „Radkappen“ – 3%, > 10 cm, < 2 kg
schwieriges Tracking und Ausweichen
 - „Granatsplitter“ – 96 %, > 1 g
derzeit kein Tracking,
kein Ausweichen möglich

Kessler- Syndrom



nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Konzepte

Weltraumgestütztes System Schall 1990

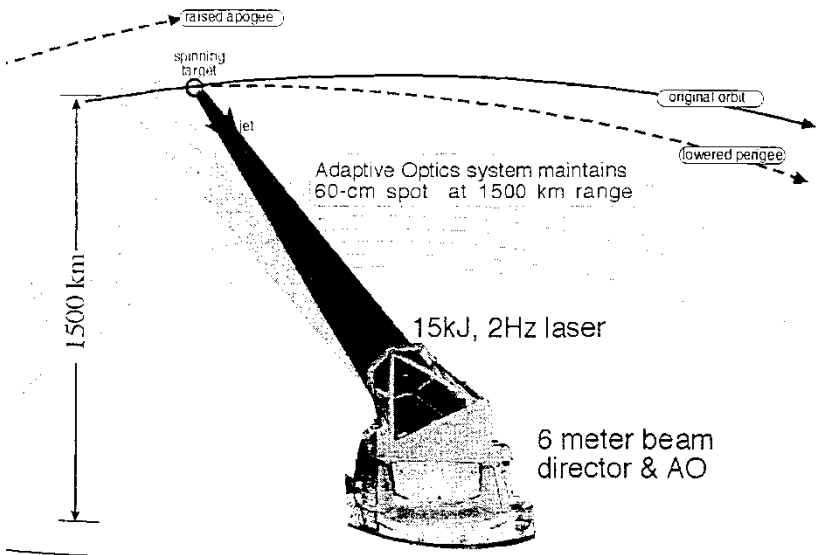
Laser: 30 ... 100 kW, 100 Hz
Range: < 100 km



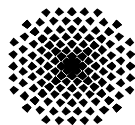
nach: B. Esmiller: Cleanspace – Space debris removal by ground based laser, HPLA/BEP 2014

Erdgestütztes System (Orion) Phipps et al. 1996

Laser: 15 kJ, 2 Hz
Range: 1500 km



EU-Projekt 2011 – 2014 (F, D, E, P)
<http://www.clean-space.eu/>



Universität
Stuttgart

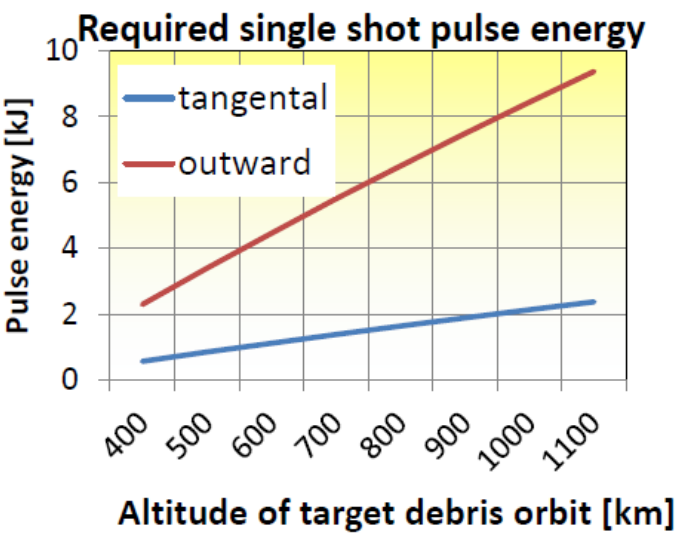
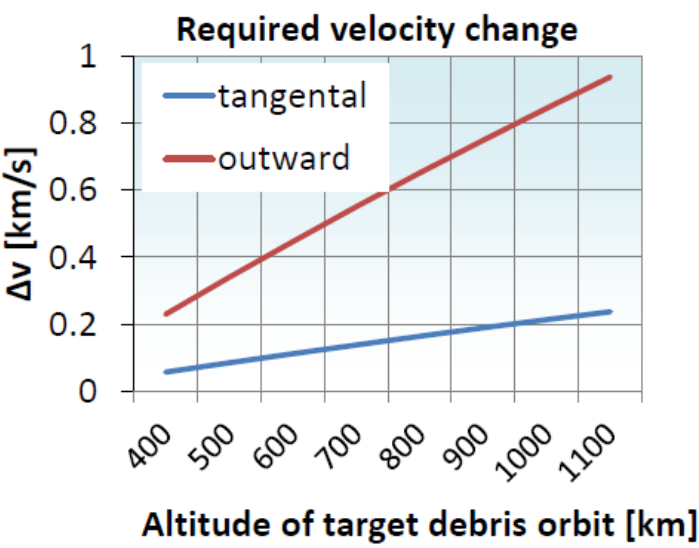
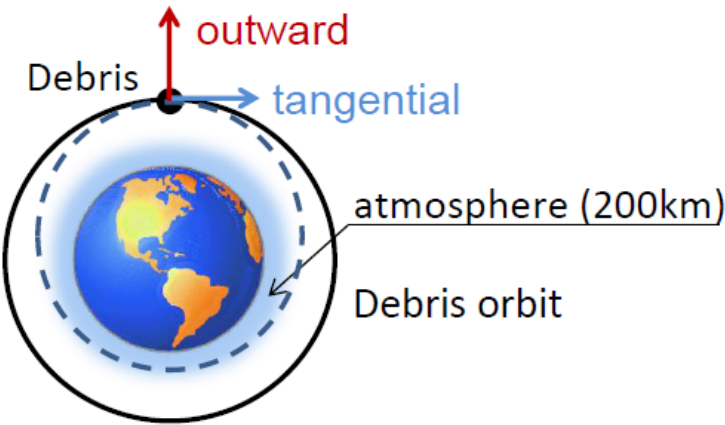
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



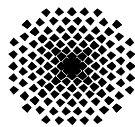
Weltraumgestützte Beseitigung

Conditions:

- Debris' mass 1 g
- Momentum coupling coefficient $C_m=10[\text{dyn/W}]=100\text{N/MW}$
- atmospheric re-entry begins at the altitude of 200 km



K. Kawakami, Phase Conjugate Light Generation for Space Debris Removal, Proceedings of HPLA/BEP 2014



CLEANSPACE – Detection, Ranging & Tracking

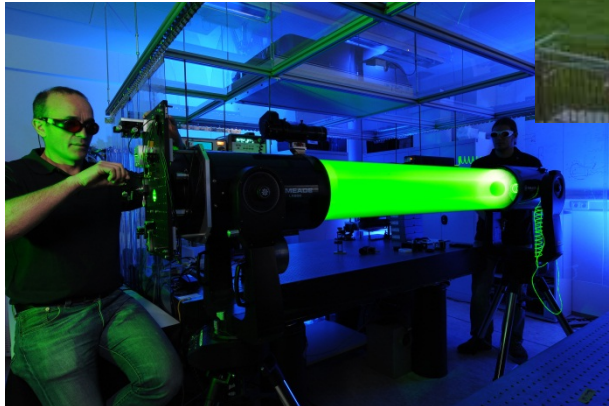
- ▶ Detektion von Weltraummüll mit $\varnothing \geq 1 \text{ cm}$
- ▶ Tracking-Genauigkeiten $\leq 100 \text{ nrad}$
- ▶ Adaptive Optik zu Turbulenzkompensation
- ▶ Laser-ranging (Time-of-flight)



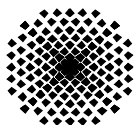
Spur eines Debris-Objekts



Beobachtungsstation
Uhlandshöhe, Stuttgart



Laborexperiment

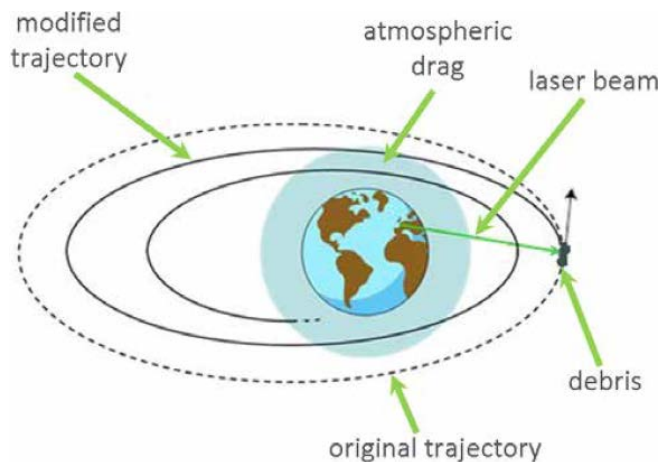
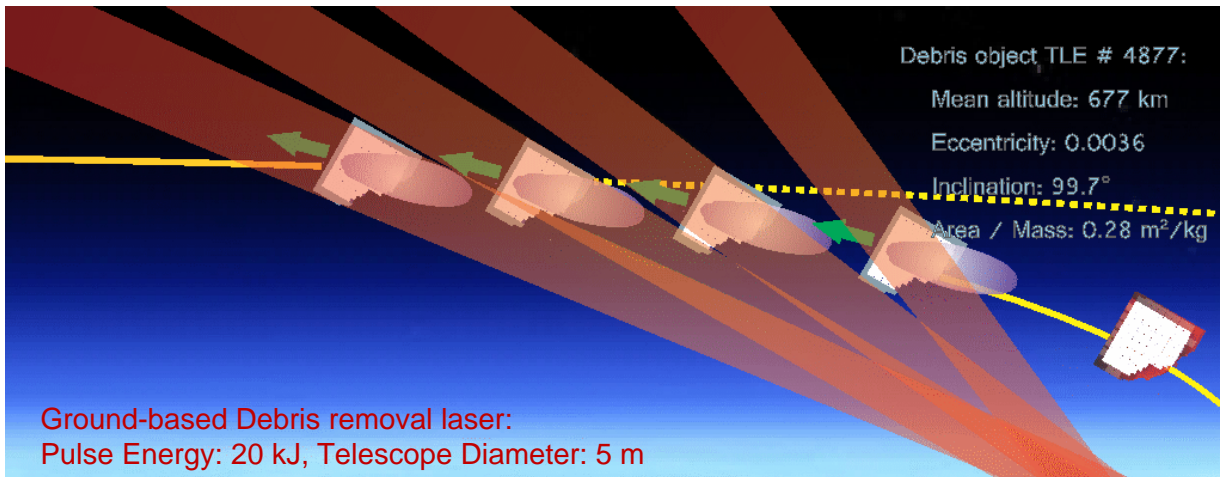


Universität
Stuttgart

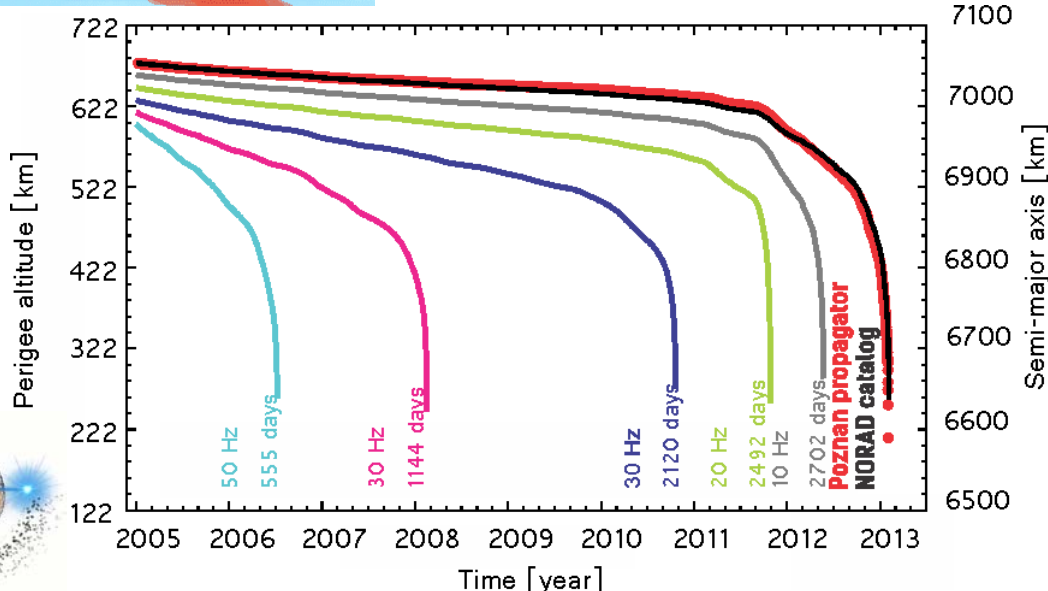
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



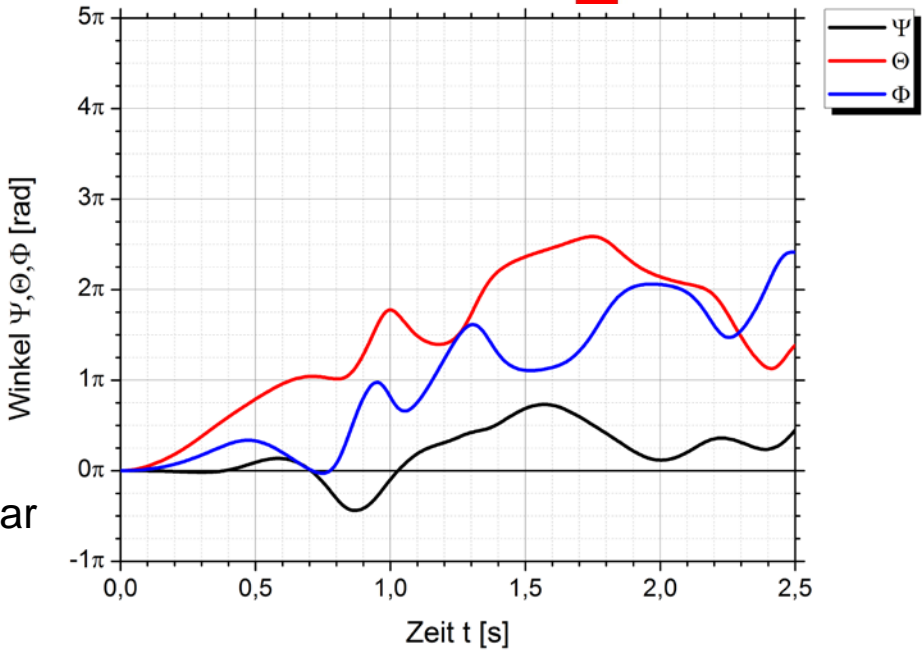
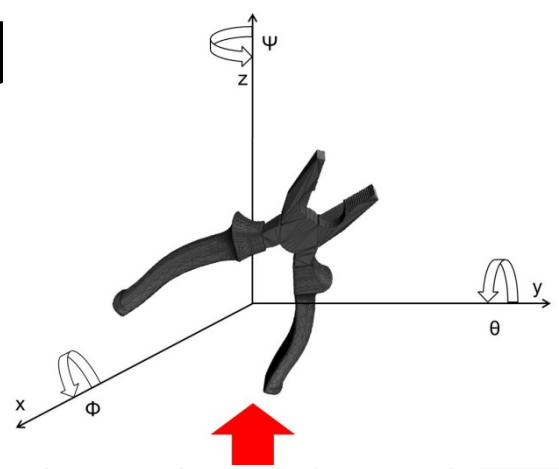
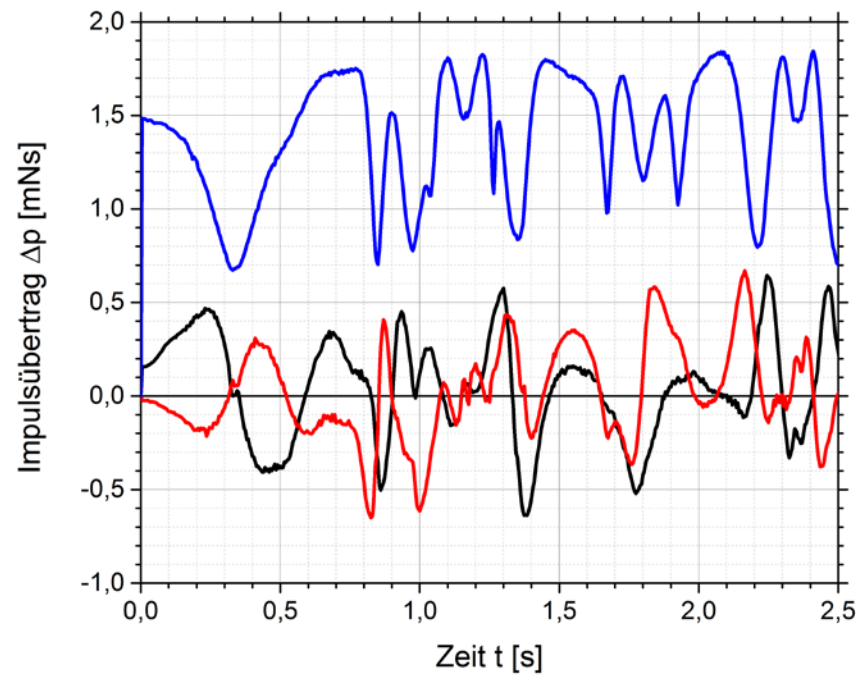
CLEANSPACE – Beseitigung von Debris



- Spotgröße am Target: \varnothing 0,5 m
- Laserpuls $E_L \leq 15 \text{ kJ} \rightarrow \Phi \geq 7,5 \text{ J/cm}^2$
- Rep.-rate $f_{rep} > 10 \text{ Hz} \rightarrow \bar{P} > 150 \text{ kW}$
- Wellenlänge: $\lambda = 1,0 \dots 1,1 \text{ }\mu\text{m}$



Impulserzeugung



- Richtung des Lateralimpulses nicht vorhersagbar
- starke Abhängigkeit von Orientierung im Raum
- Synchronisierung mit Lichtkurve sinnvoll

Inhalt

1 Einleitung

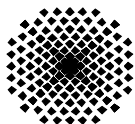
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

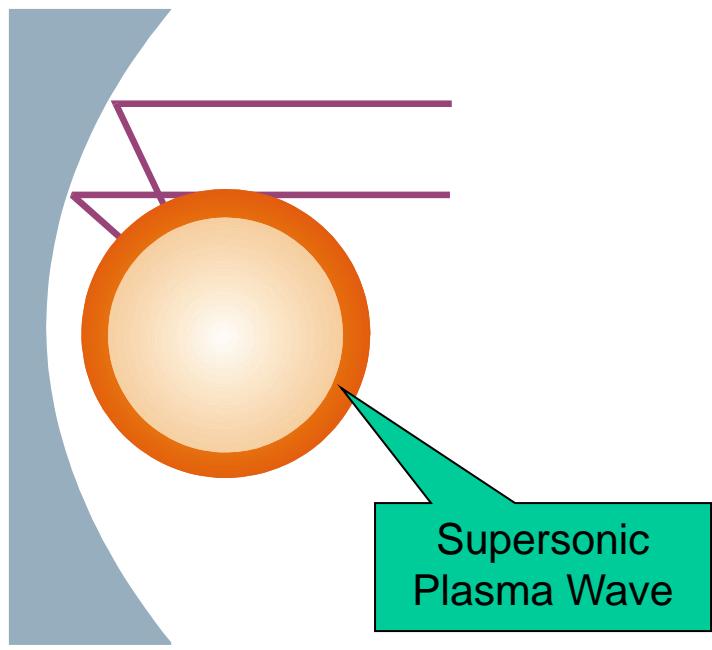
3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > **3.3 Laser Lightcraft**
 - > 3.3.1 Detonationsprozesse
 - > 3.3.2 Lightcraft Technology Demonstrator
 - > 3.3.3 Parabolisches Lightcraft (DLR)
 - > 3.3.4 Russland - ASLPE
 - > 3.3.5 Earth-based LEO launch

4 Zusammenfassung

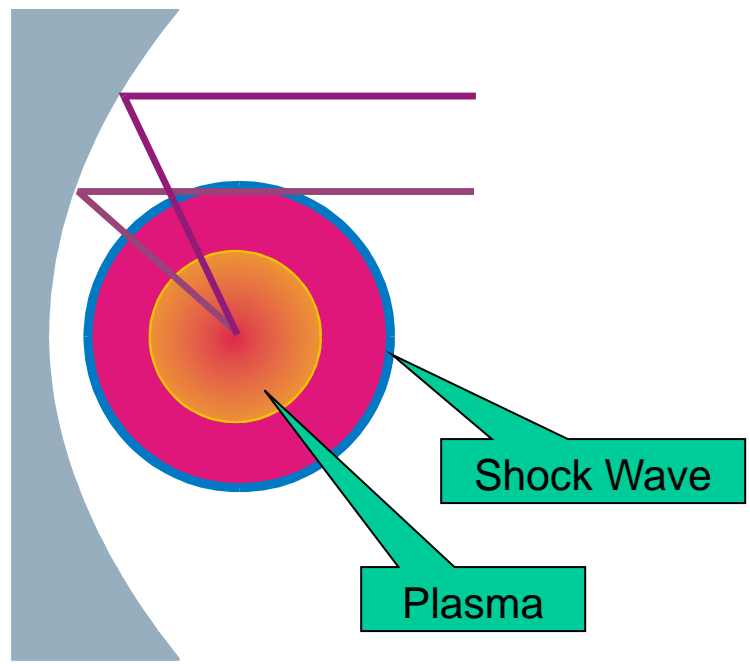


Lasergestützte Absorptionswellen



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \rightarrow \omega_{Laser}$$

Laser Supported Detonation Wave (LSD)
 $I > 10^7 \text{ W/cm}^2$



$$\omega_{Plasma} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \ll \omega_{Laser}$$

Laser Supported Combustion Wave (LSC)
 $I < 10^7 \text{ W/cm}^2$

Detonation ablativer Treibstoffe

Interne Effizienz für reine Ablation (s.o.):

$$\eta_{\text{int}} = \frac{1}{2} c_m \cdot v_{\text{jet}} = \alpha \beta$$

β Absorptionseffizienz

α Expansionseffizienz

Interne Effizienz für exotherme Reaktionen:

$$\eta_{\text{int}} = \alpha(\beta + mQ/E_L)$$

Q Spezifische Reaktionswärme

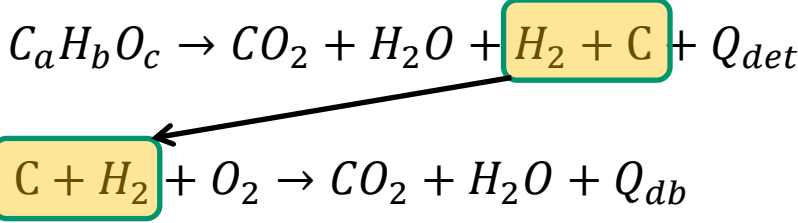
E_L Laserpulsenergie

mit $Q = Q_{\text{det}} + N_{\text{db}} Q_{\text{db}}$

Q_{det} Spezifische Detonationsenergie

Q_{db} Spez. Energie für verzögerte Verbrennung

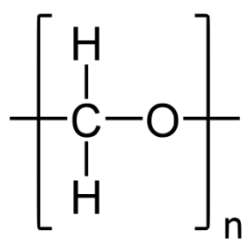
Beispiel: CHO-Polymere



Bsp: Polyoxymethylen (Delrin, POM)

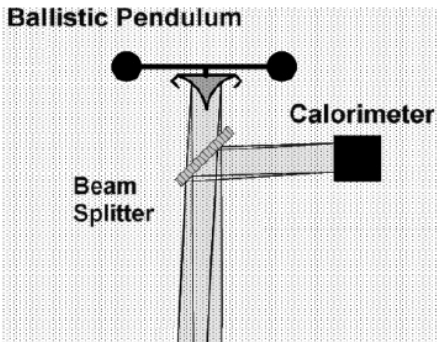
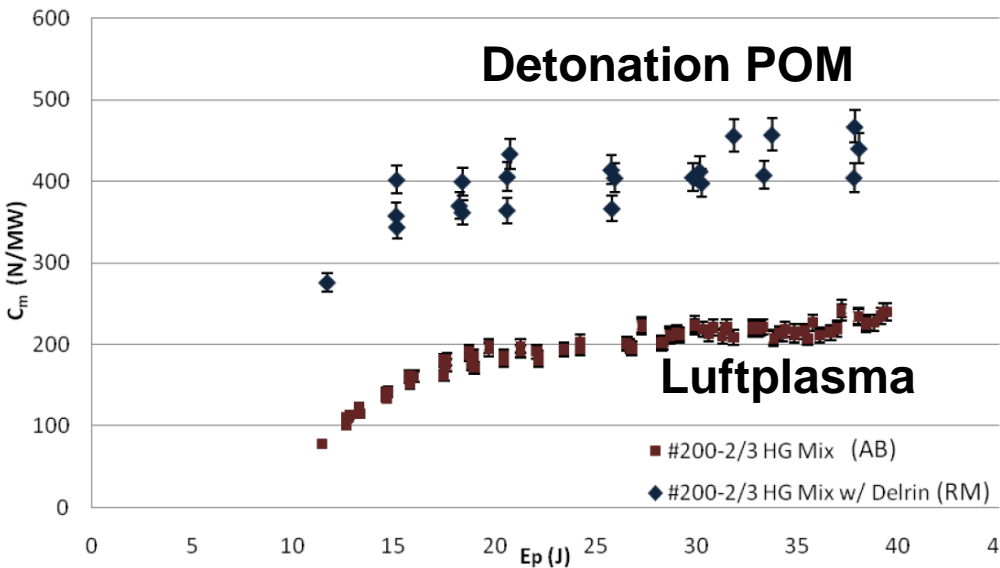
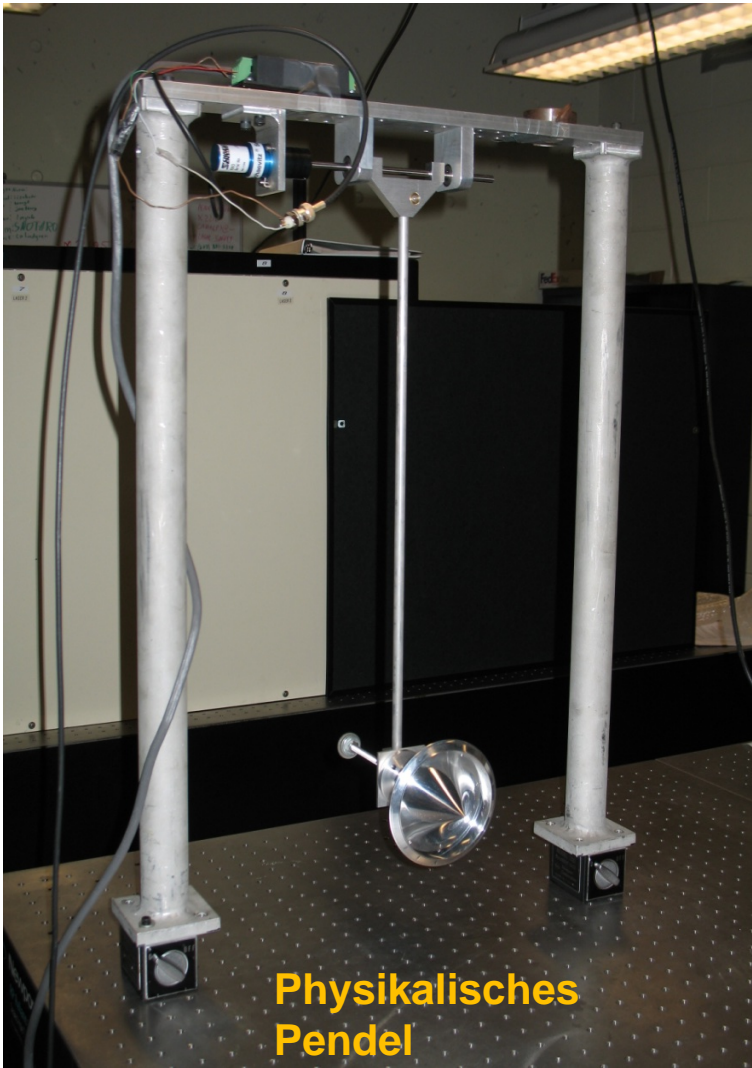
$Q_{\text{det}} = 2,69 \text{ J/mg}$

$Q_{\text{db}} = 16,1 \text{ J/mg}$

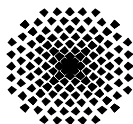


A.A. Ageichik et al, Detonation of CHO Working Substances in a Laser Jet Engine, Technical Physics **54(3)**, 402 – 409 (2009)

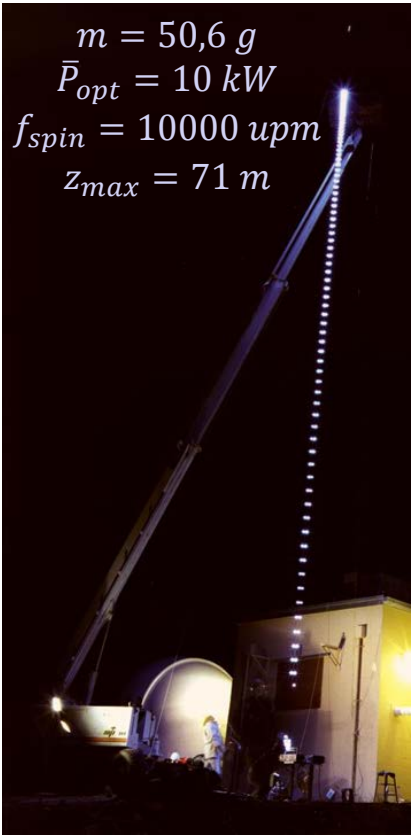
Pendelexperiment



D.A. Kenoyer et al, Axial Impulse Generation of Lightcraft Engines with ~ 1 μ s Pulsed TEA CO₂ Laser, AIP Conf. Proc. **1402**, 82 – 92 (2011)

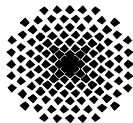


Weltrekordflug



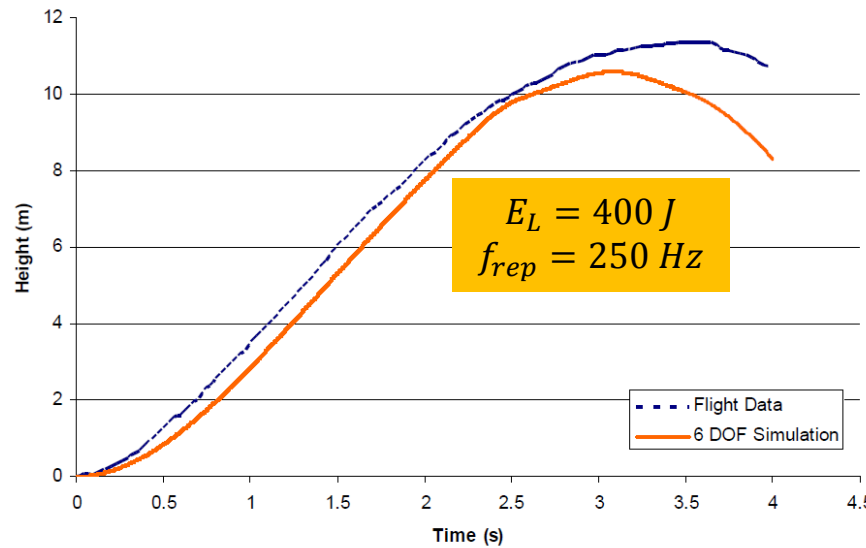
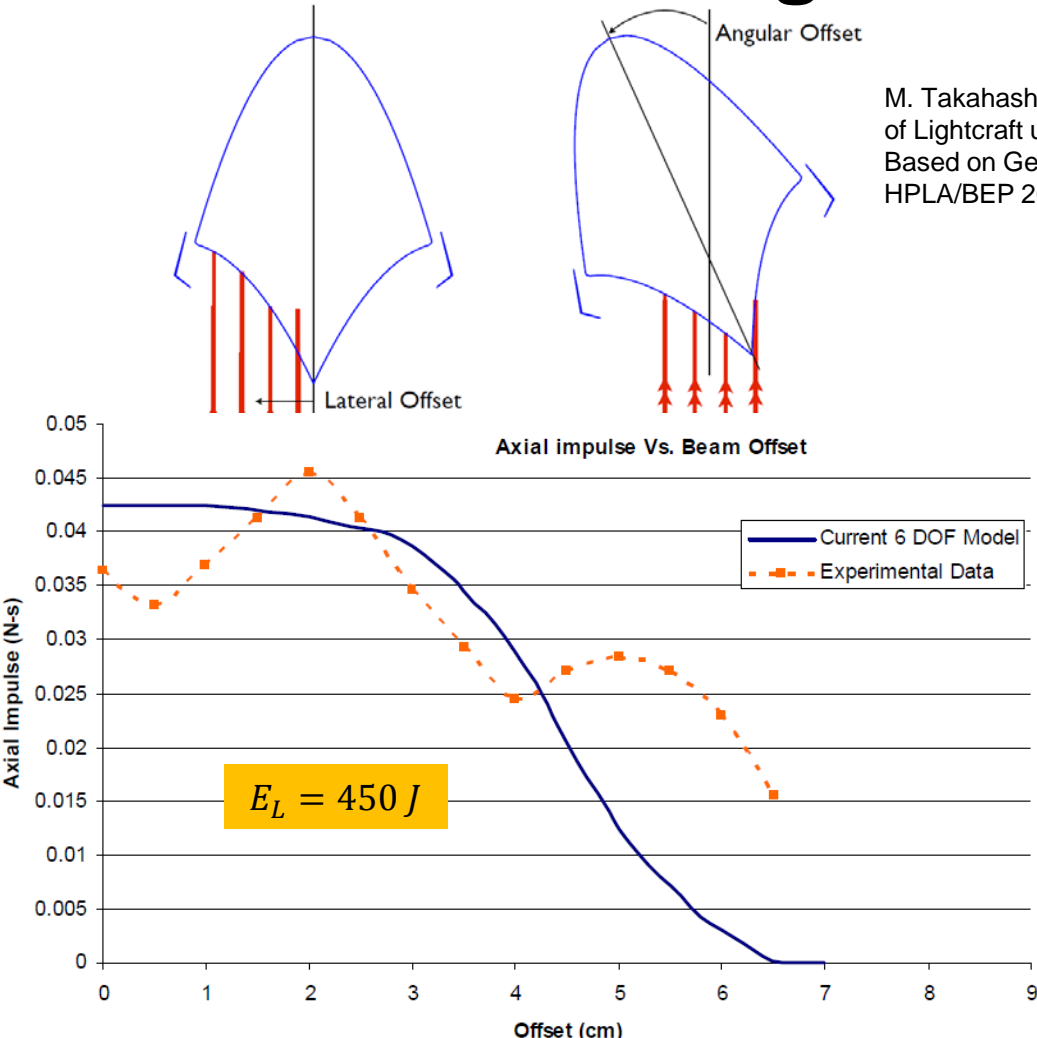
$m = 50,6 \text{ g}$
 $\bar{P}_{opt} = 10 \text{ kW}$
 $f_{spin} = 10000 \text{ upm}$
 $z_{max} = 71 \text{ m}$

L.N. Myrabo, World Record Flights of Beam-Riding Rocket Lightcraft: Demonstration of „Disruptive Propulsion Technology“, AIAA Paper 2001-3798



Flugbahnanalyse

M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014

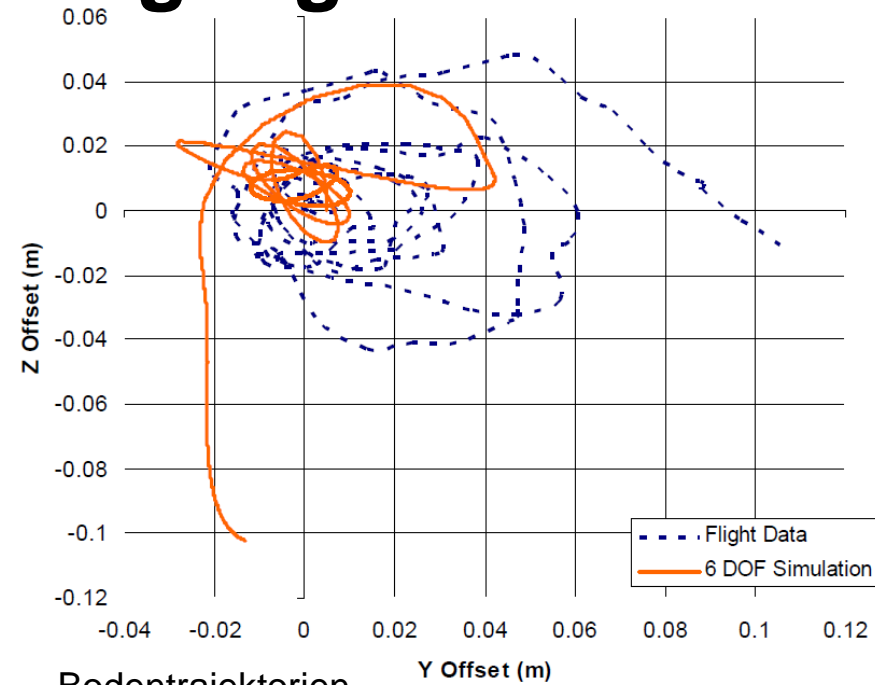
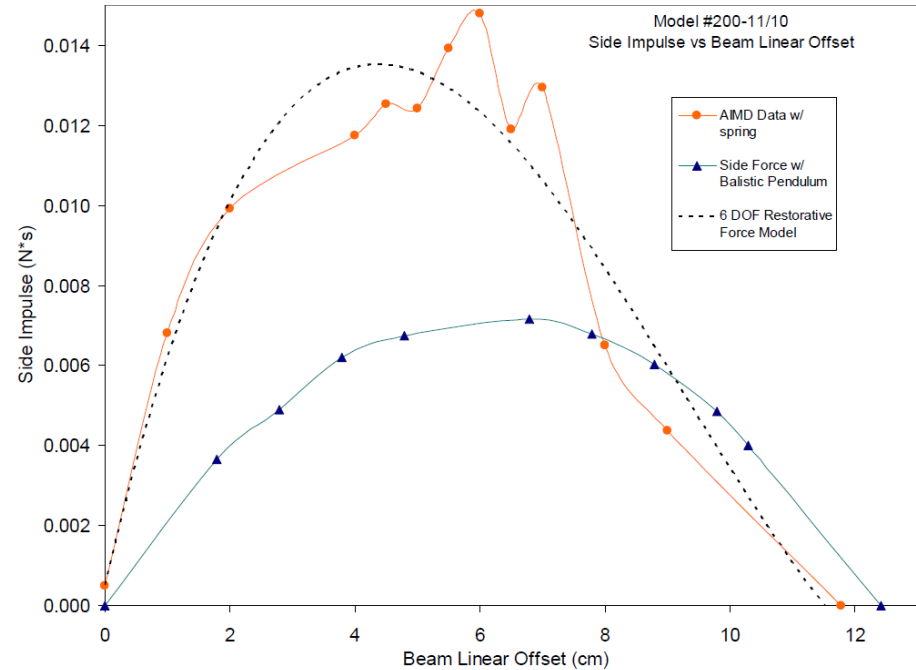


Simulationsrechnung mit aerodyn. Kräften

D.A. Kenoyer et al, Validation and Calibraton of a 6-DOF Laser Propelled Lightcraft Flight Dynamics Model vs. Experimental Data, AIP Conf. Proc. **997**, 325 – 337 (2008)

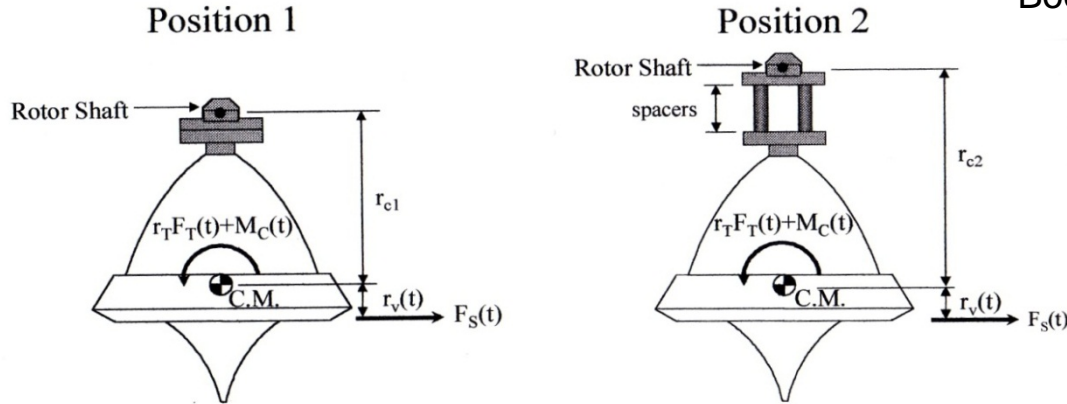
Pendelexperiment mit Lateralversatz

Lateralbewegung



Bodentrajektorien

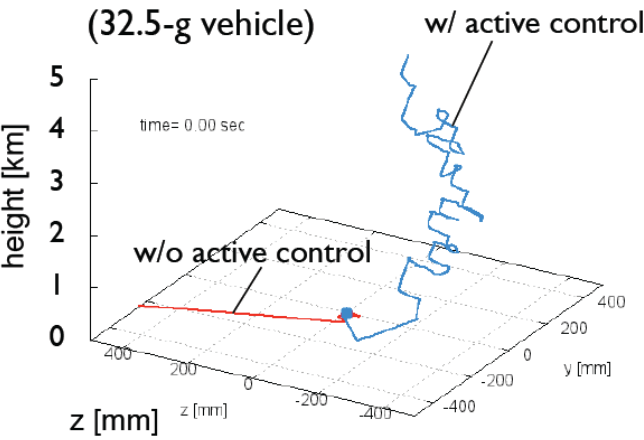
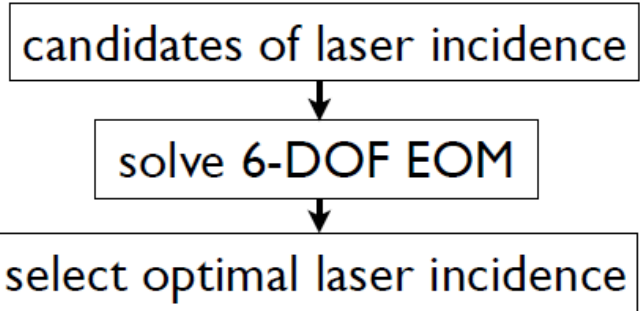
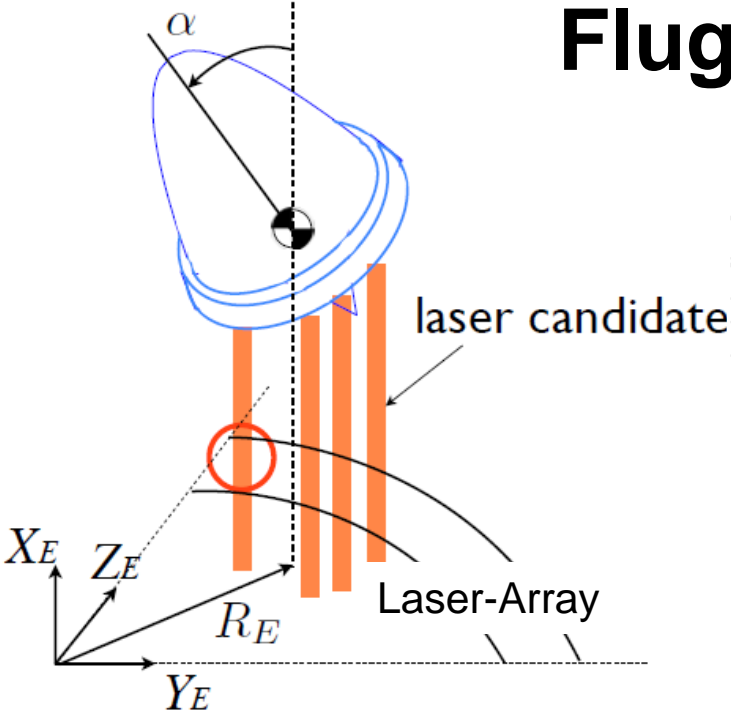
D.A. Kenoyer et al, ebd.



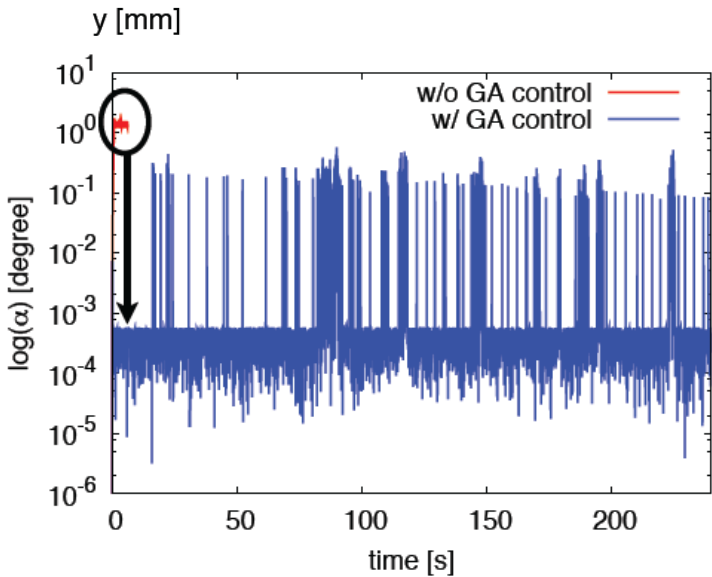
Angular Impulse Measurement Device (AIMD):

- Drehimpuls auf Rotor bei verschiedenen Trägheitsmomenten
- Drehimpuls, Lateralimpuls auf Lightcraft

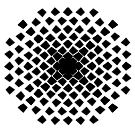
Flugstabilisierung



M. Takahashi and N. Ohnishi, Flight analysis of Lightcraft using Actively-Controlled Beam Based on Genetic Algorithm, Proceedings of HPLA/BEP 2014



α : angular offset

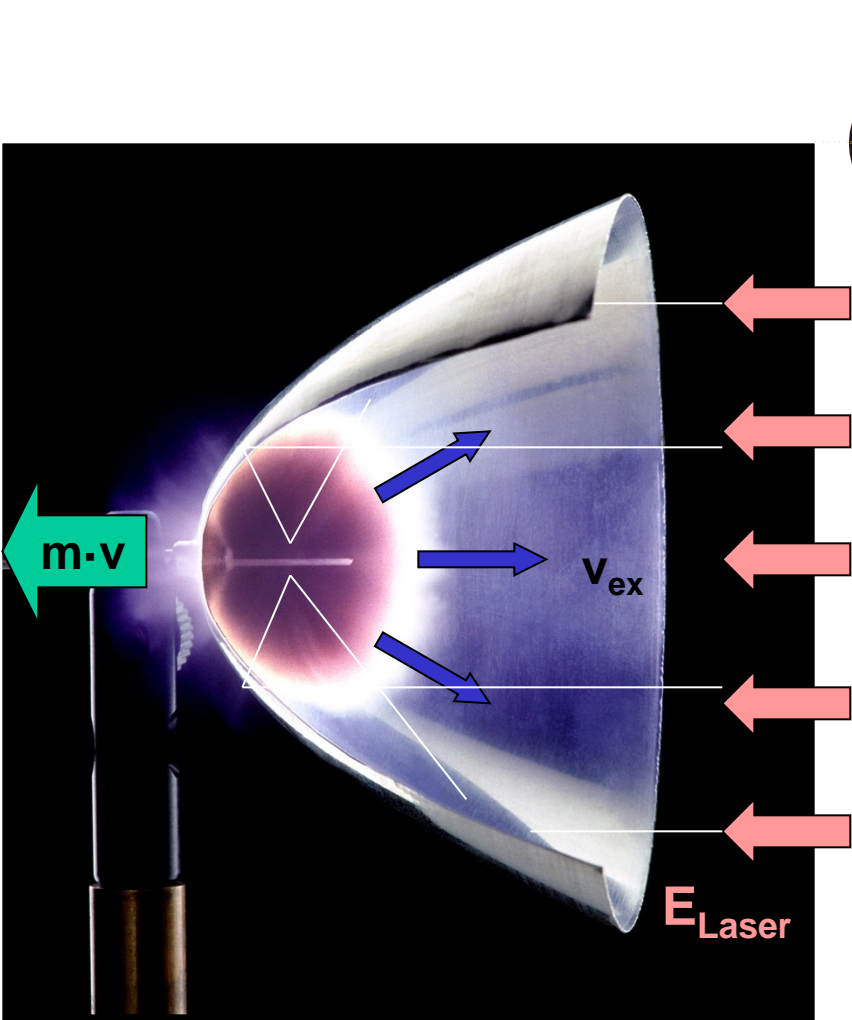


Universität
Stuttgart

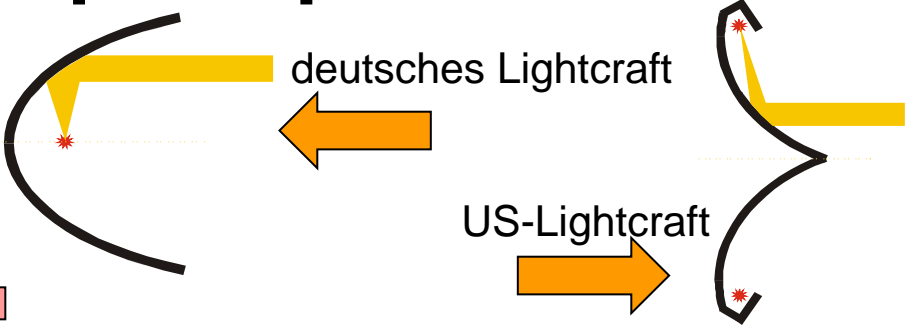
INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Funktionsprinzip



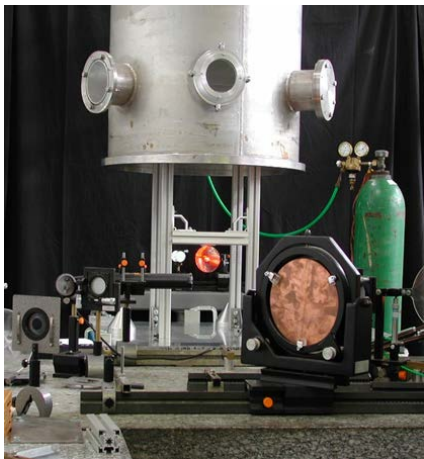
Air Plasma



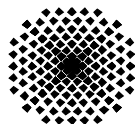
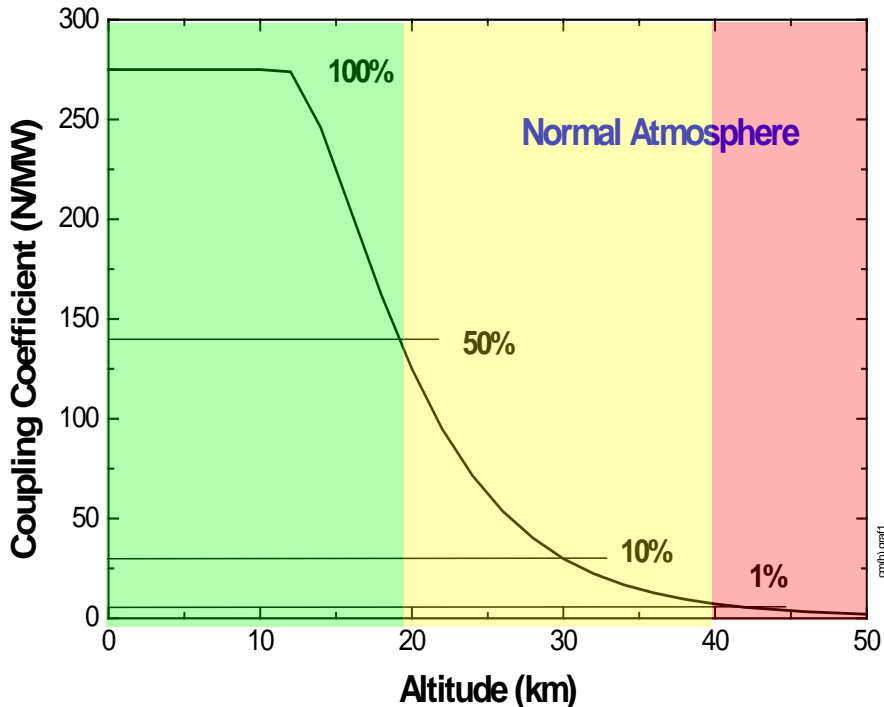
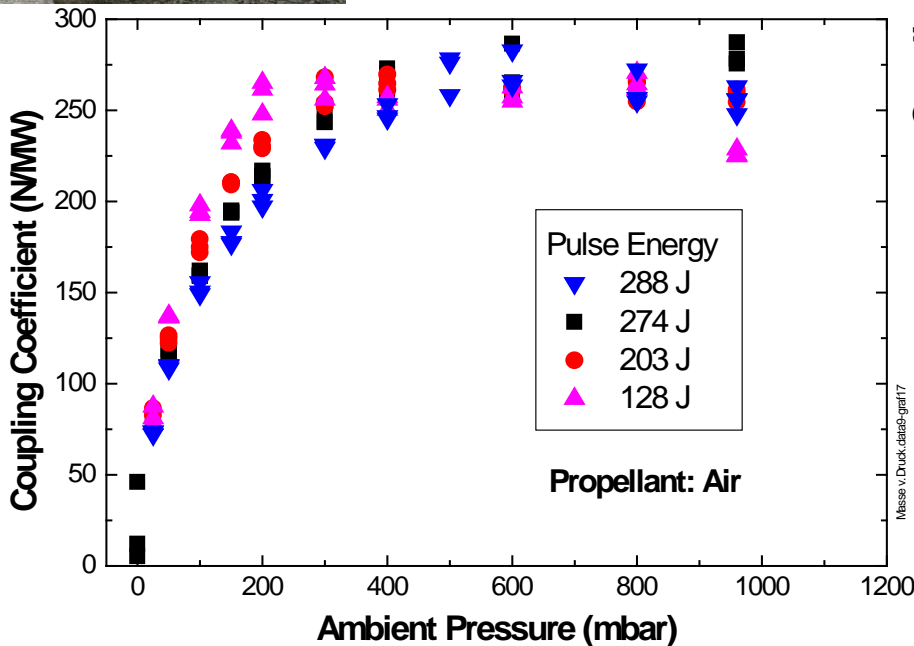
Laserpulsenergie $E_L = 20 \dots 200 \text{ J}$
Pulsdauer $\sim 8 \dots 12 \mu\text{s}$

- ⇒ Fokusintensität $> 10^7 \text{ W/cm}^2$
- ⇒ Plasmazündung
- ⇒ Schnell expandierendes Plasma
- ⇒ Impulsübertrag durch Druckanstieg und ausströmende Materie (Treibstoff/Luft)

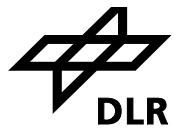
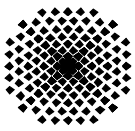
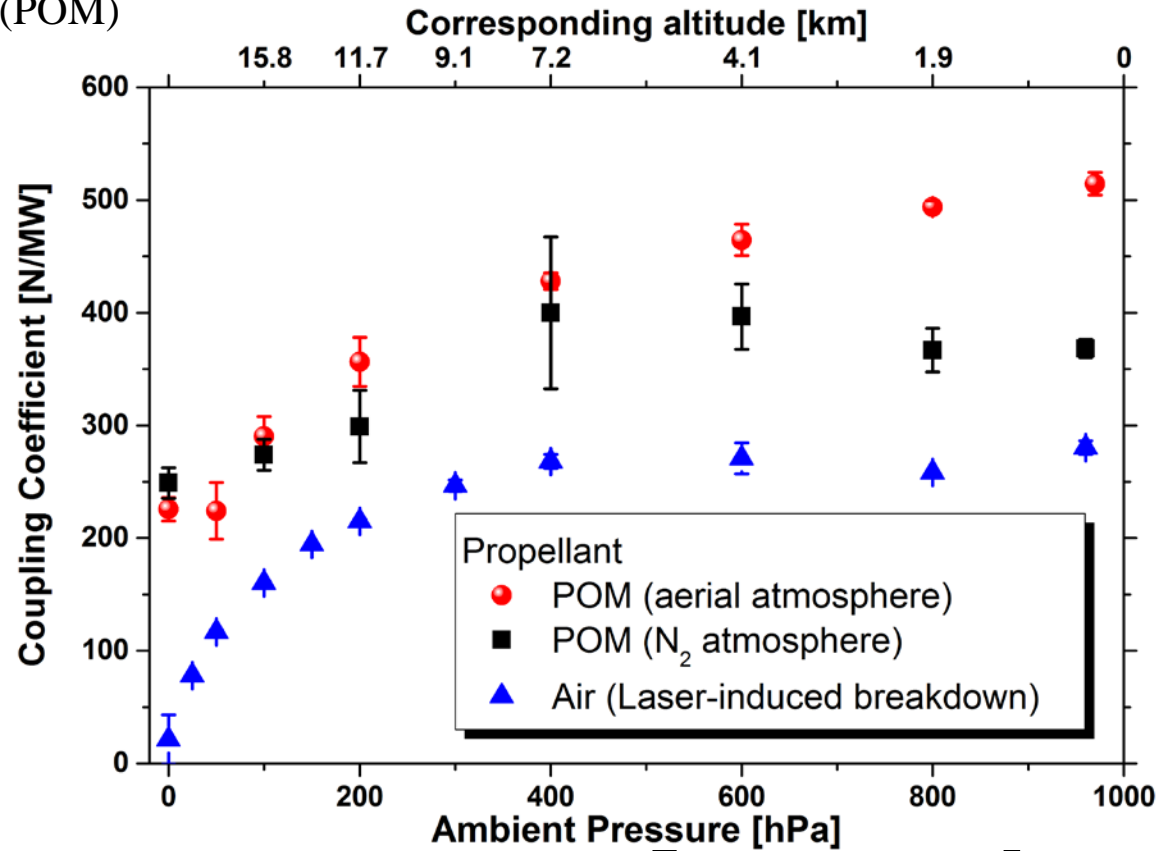
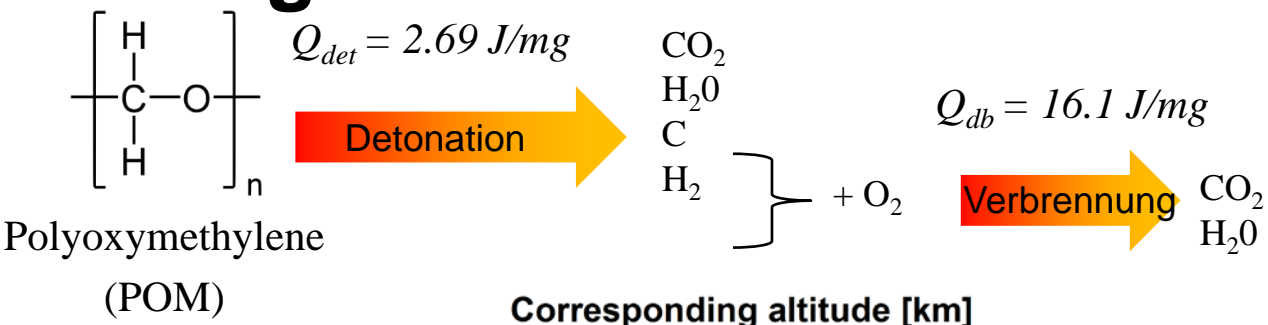
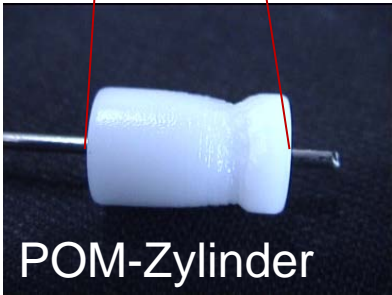
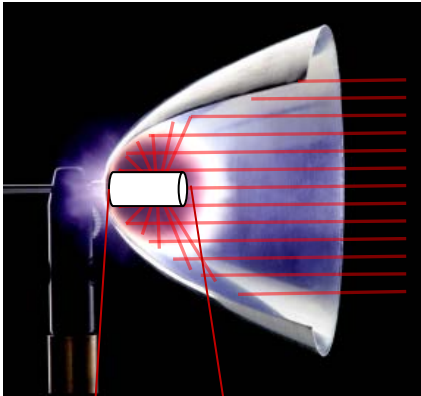
Höhensimulation – ohne Treibstoff



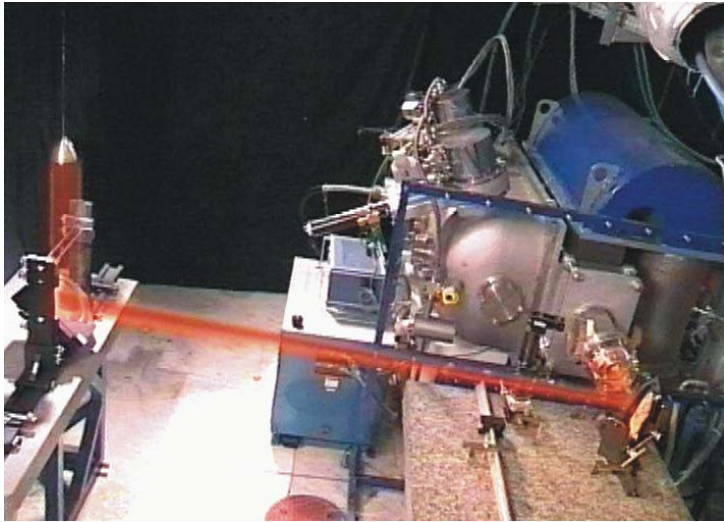
Ballistisches Pendel
im Vakuumtank



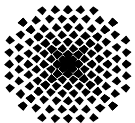
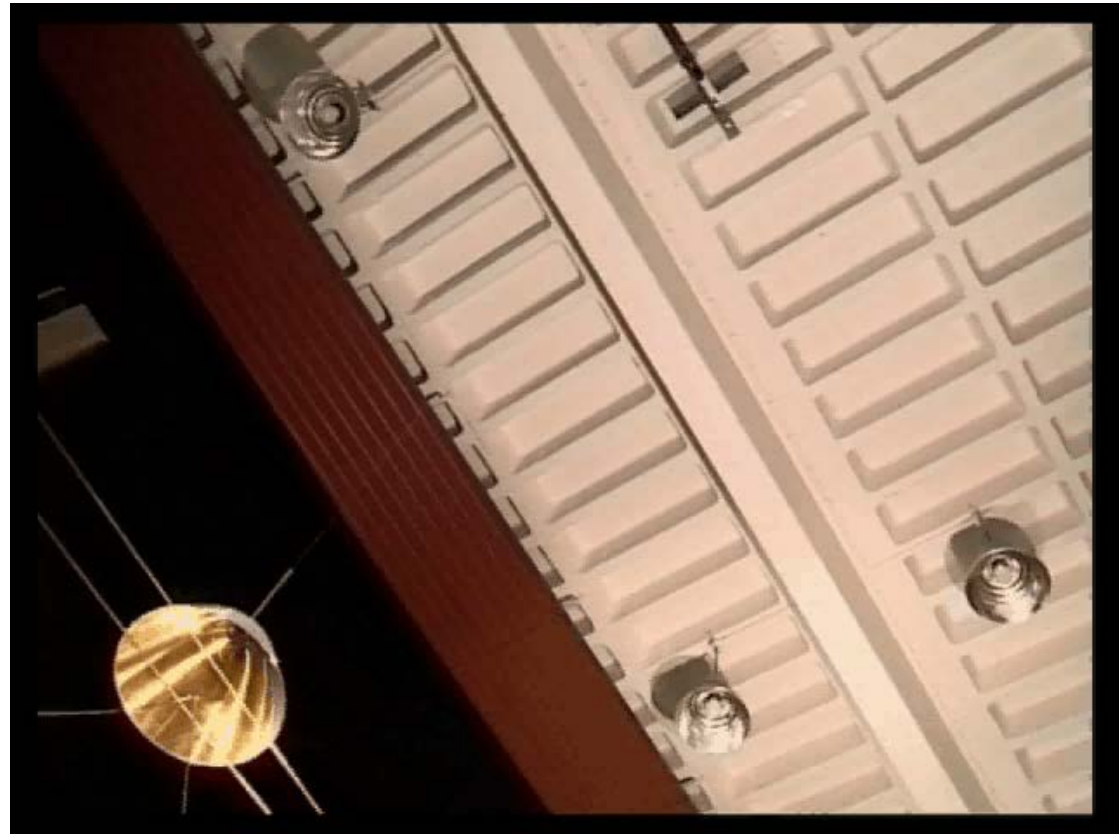
Verwendung von Treibstoff



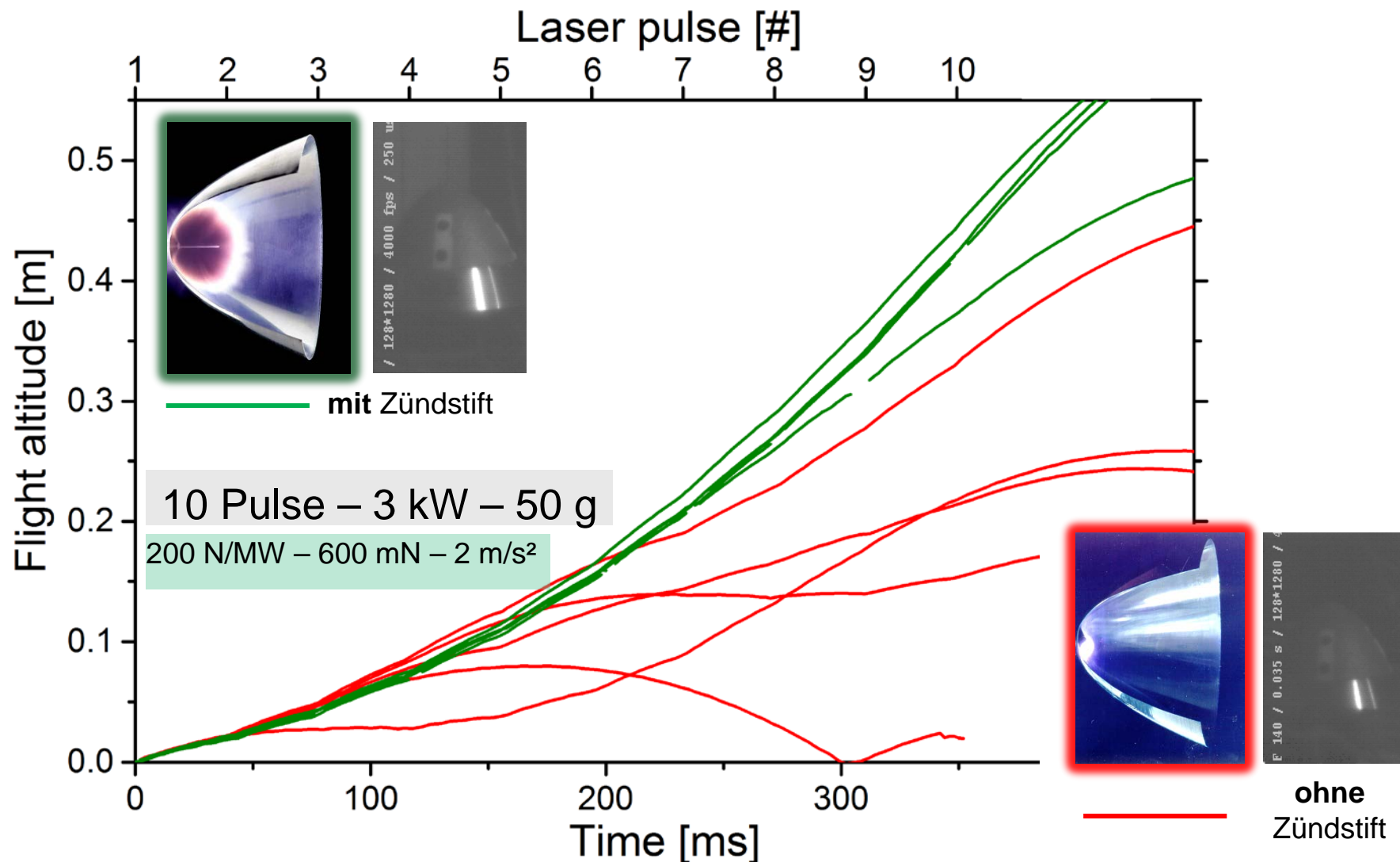
Drahtgeführte Flugexperimente



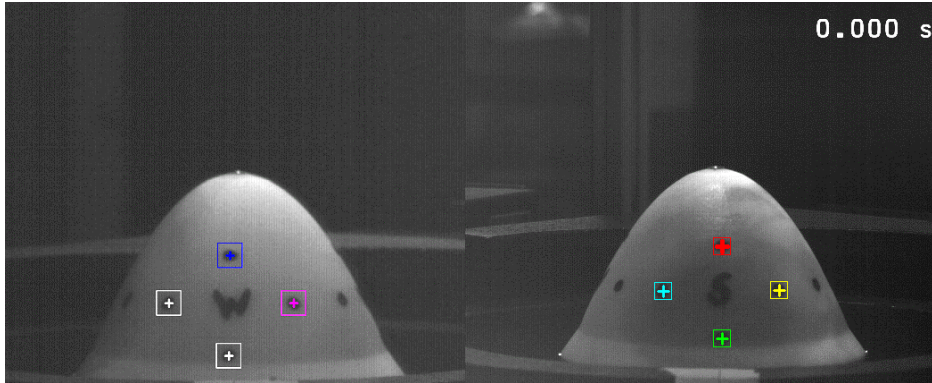
- Flughöhe 6 m
- 8 Pulse, 80 J, 15 Hz
- Beschleunigung $\sim 1g$
- $m = 22...55\text{ g}$
- Schub $T=1,05\text{ N}$
- Ohne Treibstoff
- drahtgeführt



Freiflugexperimente ohne Spin



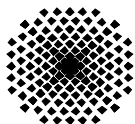
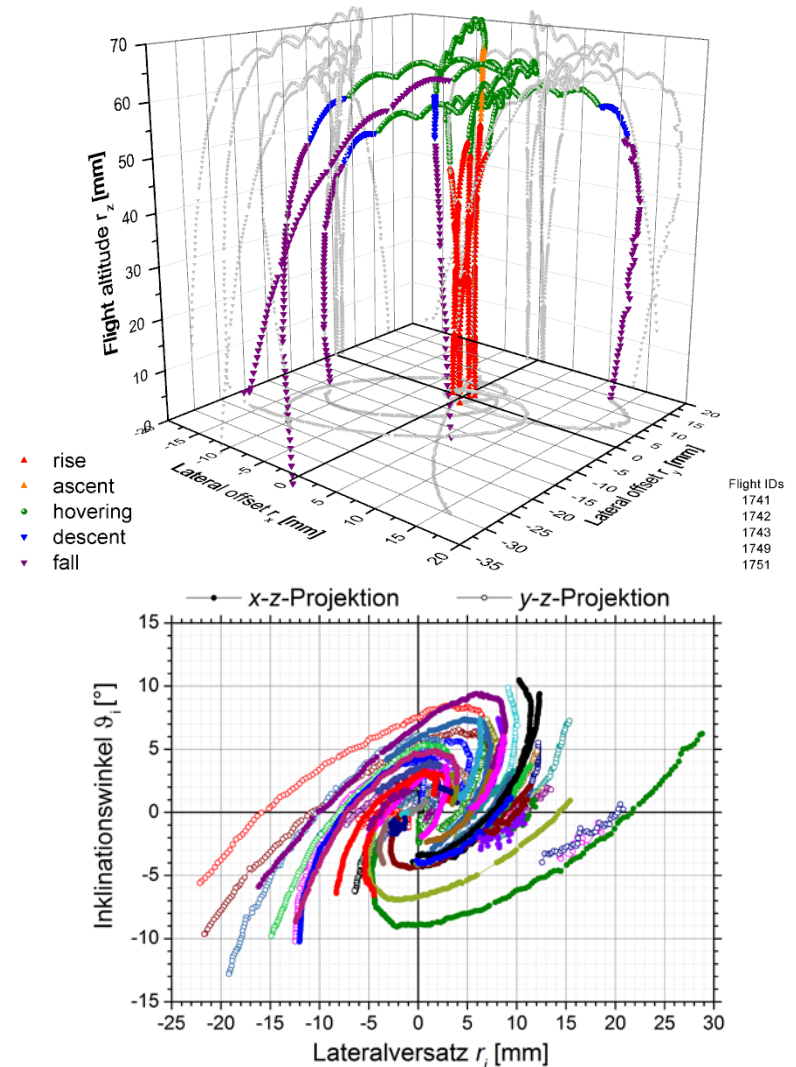
Trajektorienanalyse



- Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (500 Bilder/s) aus 2 Perspektiven (45°-Spiegel)
- Rekonstruktion von Trajektorie und räumlicher Orientierung
- Bestimmung der Impulskomponenten

S. Scharring et al, Beam-Riding Analysis of a Parabolic Laser-thermal Thruster, AIP Conf. Proc. **1402**, 115 – 131 (2011)

S. Scharring, Dissertation, Universität Stuttgart (2013)



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Aerospace Laser Propulsion Engine

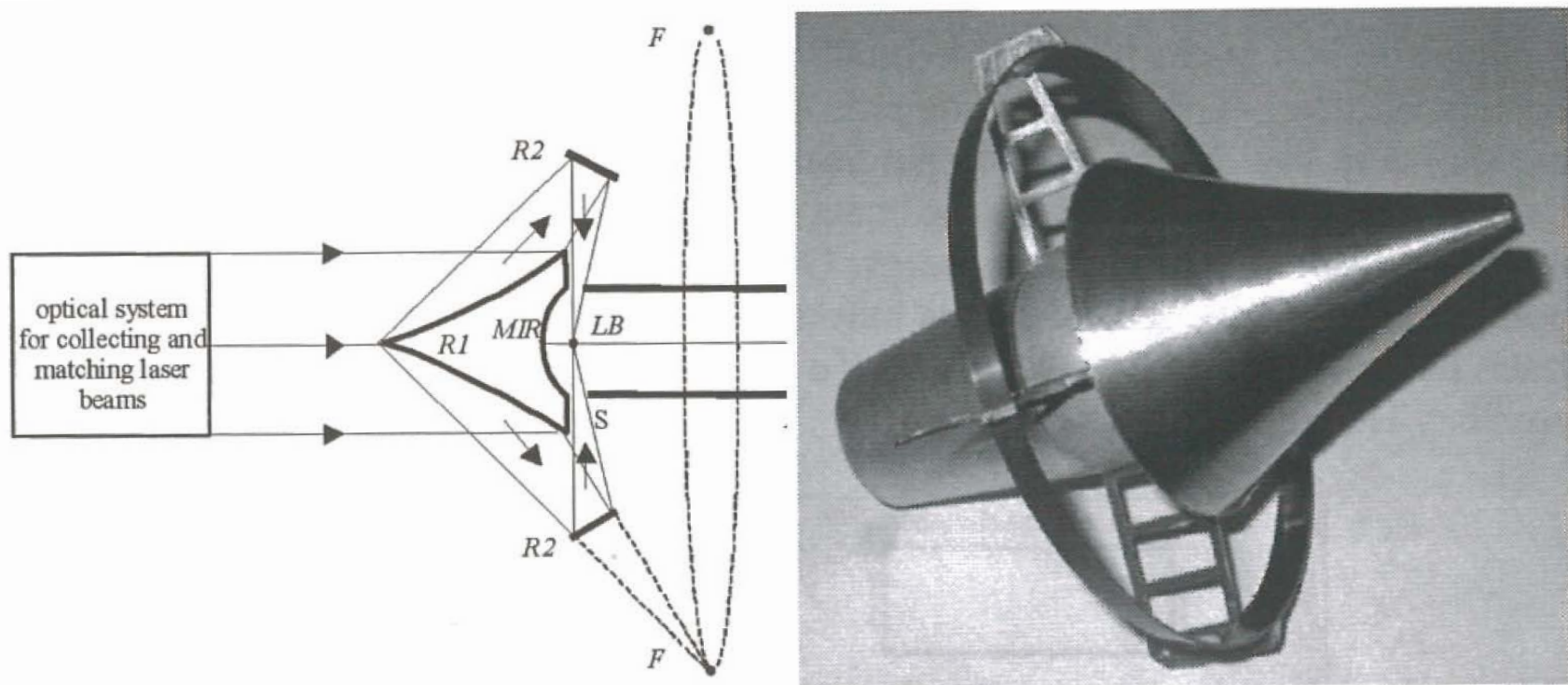
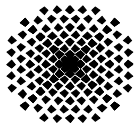


FIGURE 1. General Optical Scheme, Assembling, and a Photo of the ASLPE Model.

- Traktorstrahl
- gepulst & cw-Betrieb möglich
- CHO-Polymere als Treibstoffe

Yu. A. Rezunkov et al, Performance Characteristics of Laser Propulsion Engine
Operating both in CW and in Repetitively-Pulsed Modes, AIP Conf. Proc. **830**: 3 – 13 (2006)

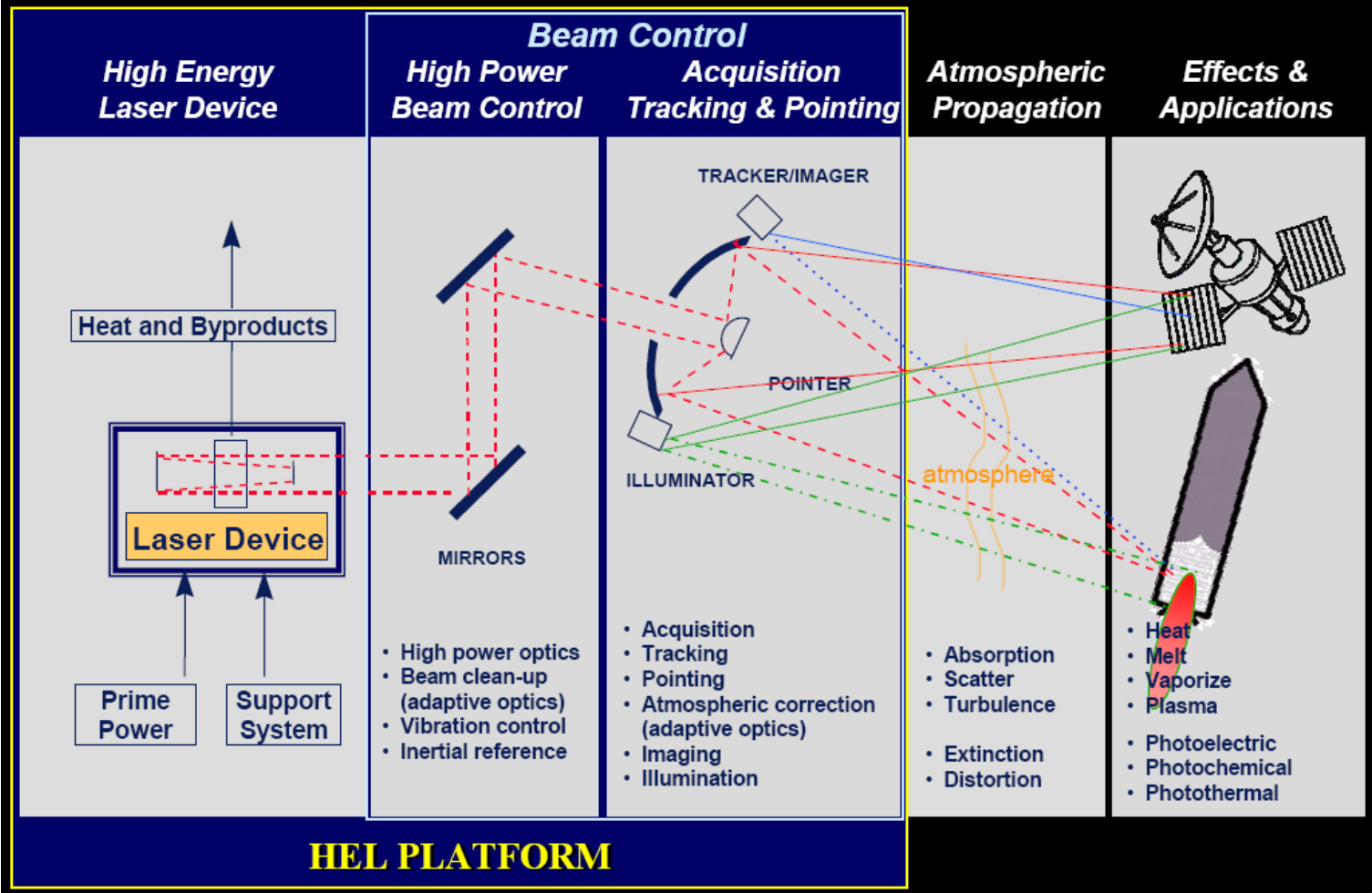


Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de

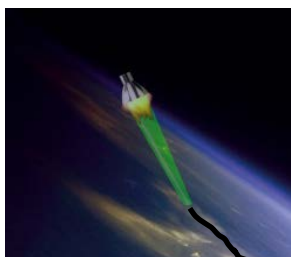


Konzeptionelle Überlegungen



J.R. Cook, Atmospheric Applications of High Energy Lasers, Proc. Of XV International Symposium on GCL-HPL 2004 Prague

Energiebilanz



$$E_{kin} = 1/2 m v^2 = \eta_{prop} \psi^{-1} \alpha \beta \gamma \delta \cdot E_{wall}$$



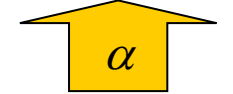
Antriebseffizienz



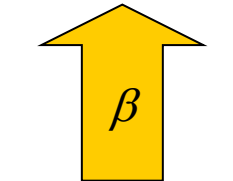
Mechanische Effizienz



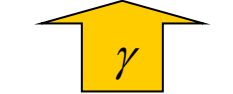
Expansionseffizienz



Absorptionseffizienz



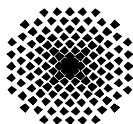
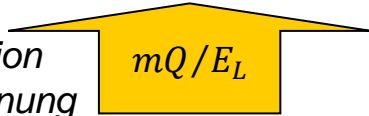
Transmissionseffizienz



Laserwirkungsgrad



- Kinetische Energie des Lightcrafts
- Energiekopplung zum Lightcraft
- Kinetische Energie des Treibstoffjets
- Innere Energie des Treibstoffes
ggf.:
Detonation
Verbrennung
- Laserpulsenergie am Treibstoff
- Ursprüngliche Laserpulsenergie
- Elektrische Energie



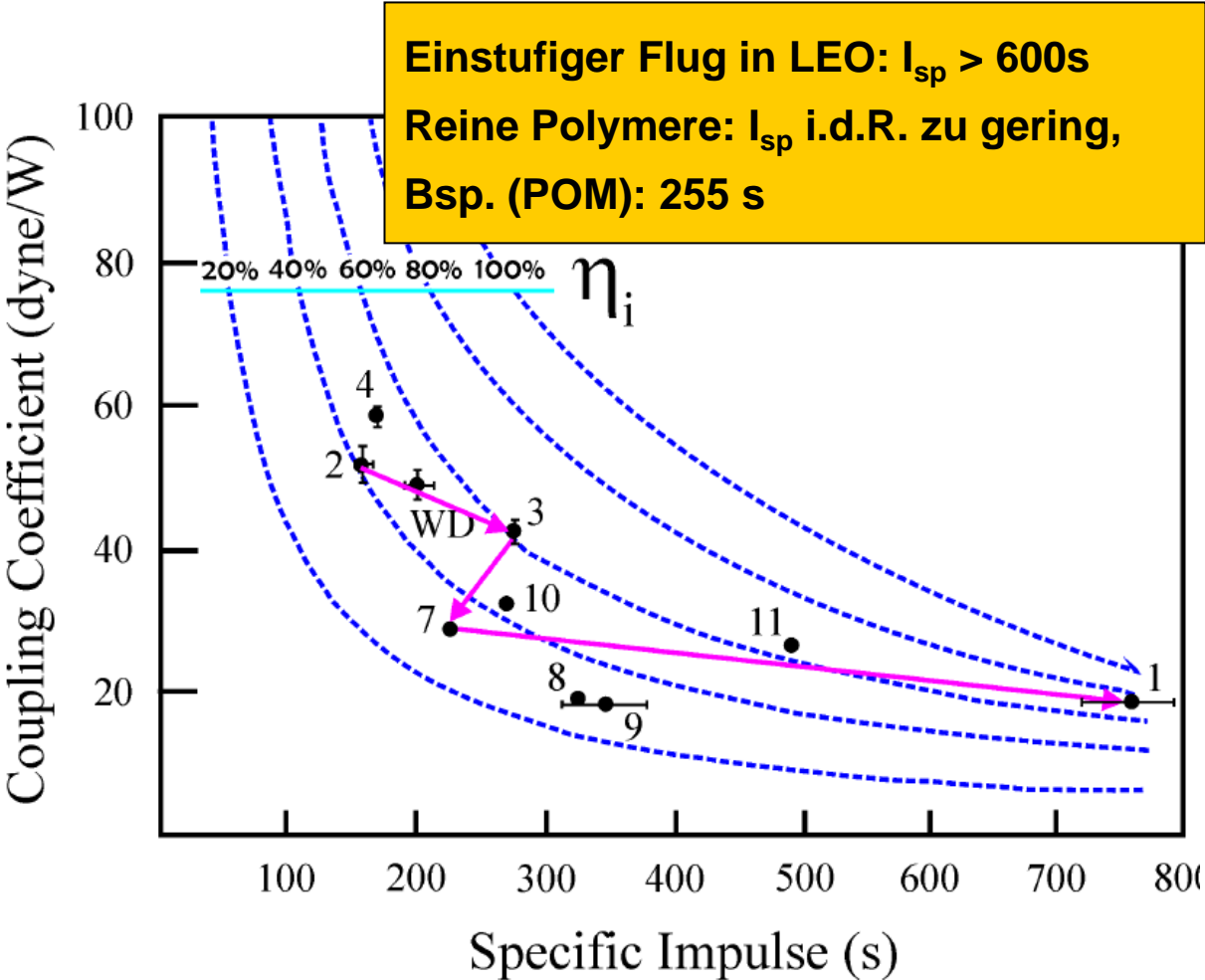
Constant momentum mission

Dynamische Anpassung:
 $V_{jet} = V_{rocket}$
anstelle von
 $V_{jet}=const.$

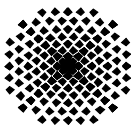
Hohes c_m : 485 N/MW
Ammoniumperchlorid (AP)

Hoher I_{sp} : 754 s
Teflon (PFTE)

Zeitliche Variation der
Treibstoffzusammensetzung

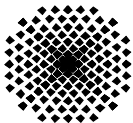


Larson, C.W., Mead, F.B, Knecht, S.D., Laser Propulsion and the Constant Momentum Mission, AIP Conf. Proc. **702**, 216 – 227 (2004)
Pakhomov, A.V., Mahaffy, K.E., Binary Solid Propellants for Constant Momentum Missions, AIP Conf. Proc. **997**, 266 – 279 (2008)



Systembetrachtungen

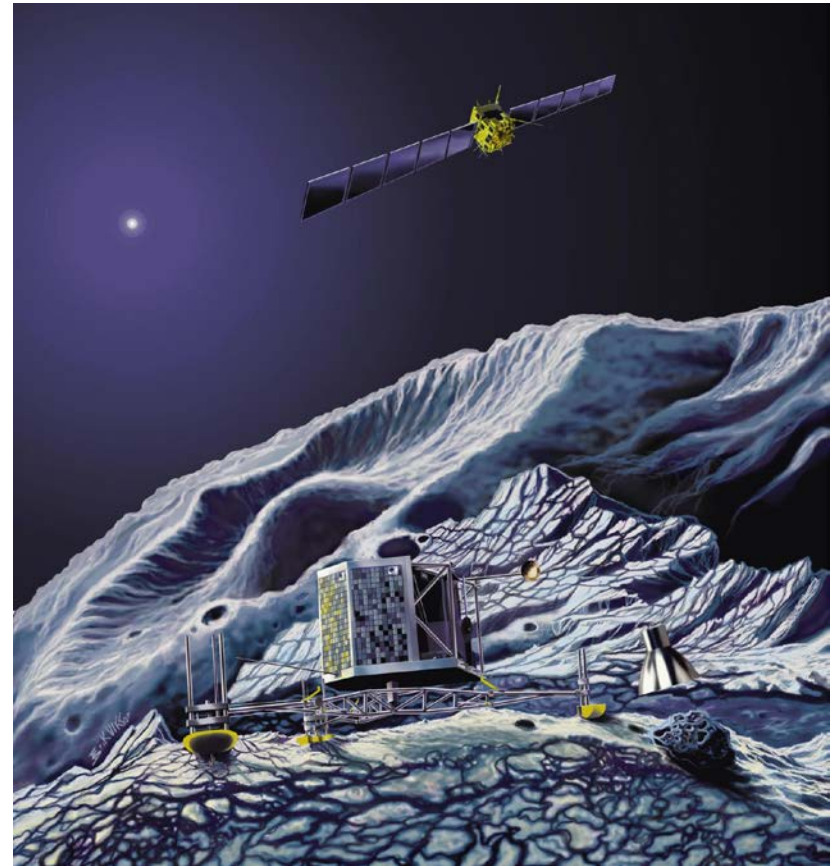
- Teleskop mit einer Reichweite bis zu 1000 km
- adaptive Optik erforderlich
- Mittlere optische Laserleistung:
0,2 ... 1 MW / kg Nutzlast
 - hohe Anfangsinvestition
- Externe Energiequelle:
 - günstiges Masse/Nutzlast-Verhältnis
 - Einfache Antriebstechnologie
 - geringe Startkosten
 - hohe Startfolge



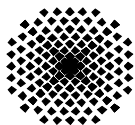
Weltraumgestützte Alternativen



Logistische Missionen



Probenrücksendung



Inhalt

1 Einleitung

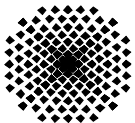
2 Laser

- > 2.1 Funktionsprinzip
- > 2.2 Beispiele
- > 2.3. Ausbreitung von Laserstrahlung

3 Antriebskonzepte

- > 3.1 Überblick
- > 3.2 Ablative Laserantriebe
- > 3.3 Laser Lightcraft

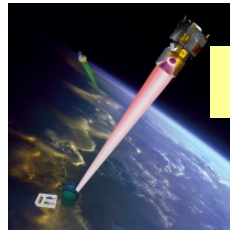
4 Zusammenfassung



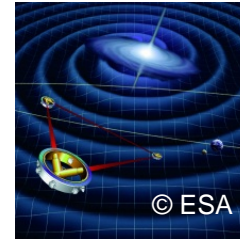
Skalierung und Anwendungsgebiete



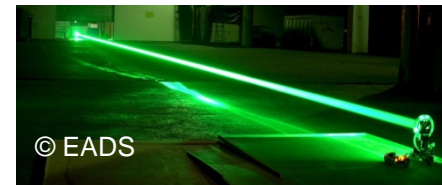
Photonenantrieb



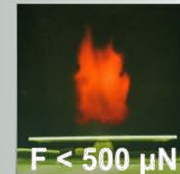
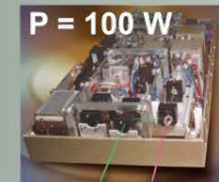
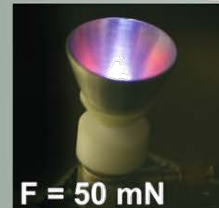
Lightcraft



- Mikroantriebe
- Debris removal
- Photovoltaik + Laser



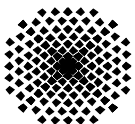
$$c_m = \frac{\text{thrust}}{\text{laser power}} =$$



Derzeitige Entwicklung

Mittelfristige Anwendung

Langfristige Vision



Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



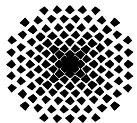
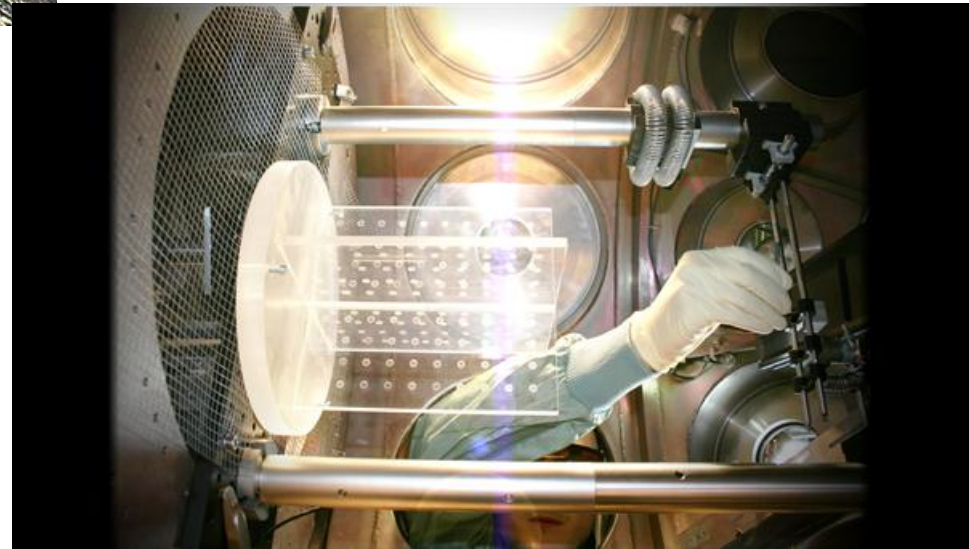
Offene Masterarbeiten



**Freifallversuch im Vakuum mit synchronisierter
Laserbestrahlung zur laser-ablativen
Impulserzeugung - Auswertung und Planung**

**Demonstratormodul zu laser-ablativen
Mikroantrieben für das Pikosatellitenprogramm
UWE - Konzeptionierung und Design**

Ansprechpartner:
Dr. R.-A. Lorbeer
Raoul.Lorbeer<at>dlr.de



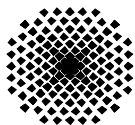
Universität
Stuttgart

INSTITUT FÜR RAUMFAHRTSYSTEME
www.irs.uni-stuttgart.de



Abbildungsnachweis

- DLR – Institut für Technische Physik: Seite 5, 7-9, 11, 13, 23, 25, 27, 28, 31, 37, 38, 54 – 58, 61, 63, 64, 73 – 78, 83, 85, 86
- Seite 6:
 - Quander Metall- und Lasertechnik, <http://www.quander.de/lasertechnik/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Entertainment Weekly, <http://www.telegraph.co.uk/film/star-wars-the-force-awakens/facts-characters-best-scenes/> zuletzt aufgerufen: 12.01.2016
 - EPA (Handout), in Die Presse.com, Aufblasbarer Weltraumaufzug soll 200 Kilometer hoch werden, 19.06.2009 , <http://diepresse.com/home/science/488552/Aufblasbarer-Weltraumaufzug-bis-in-200-Kilometer-Hohe>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Ascending Technologies, in: online Focus, Mini-Hubschrauber - Verkehrsüberwachung per Fernsteuerung, 01.02.2012, http://www.focus.de/auto/news/mini-hubschrauber-verkehrsueberwachung-per-fernsteuerung_aid_709334.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Dr. med. Inken Lamcke, Femto- Lasik – PRK, 2013, <http://www.augenarzt-berlin.com/femto-lasik-prk/>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Nations Wiki, Death Star I, http://nations.wikia.com/wiki/Death_Star_I, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Bundeshandelsschule und Bundeshandelsschule Völkermarkt, Photonenantrieb, <http://www.hak-vk.at/index.php?id=2861>, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 8:
 - The New York Times, Arthur R. Kantrowitz, Whose Wide-Ranging Research Had Many Applications, Is Dead at 95, 9.12. 2008, http://www.nytimes.com/2008/12/09/science/09kantrowitz.html?_r=0, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
 - Apogee Books, Author Biographies – Leik Myrabo, http://www.apogeespacebooks.com/Author_Bios/leik_myrabo.html, zuletzt aufgerufen: 14.01.2014,
- Seite 12:
 - NASA – National Space Science Data Center, Sputnik 1, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/database/MasterCatalog?sc=1957-001B>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Smithsonian National Air and Space Museum,
 - Heise Foto, Erich Kapfenberger, DampfloK, <http://www.heise.de/foto/galerie/foto/DampfloK-cc8ca0aab40ec62ada6180479fac5c82/>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - Bahnbilder aus dem Rhein-Main-Gebiet, Kai Hesse, http://www.bahnbilder.net/bilder/03-10-07/IMG_6597.jpg, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 15:
 - Thomas Edwards, The history of the laser, 2011, http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2011.web.dir/Thomas_Edwards/History.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - APS Physics, Focus: Invention of the Maser and Laser, 2005, <http://physics.aps.org/story/v15/st4>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 16:
 - Deutscher Schaustellerbund in: Impulse, 22.11.2013, <http://www.impulse.de/leben/talfahrt-fur-wilde-karusselle-wie-sich-das-geschafft-der-schausteller-verandert>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - Best Greetings, e-Cards, Orkut Scraps, Glitter Graphics 4 All- Copy and Paste, <http://easyscraps.blogspot.de/2010/09/free-emoticons-for-orkut.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014
 - SmilieCenter, Big smilies 0031, http://www.smiliecenter.de/0/big/big_smilies_0001.htm, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014



Abbildungsnachweis

- Seite 21: Wikipedia in http://www.klangspiel.ch/laser_pointer_red_774/, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 22: LLNL Public Affairs Office in: [http://en.wikipedia.org/wiki/Nova_\(laser\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Nova_(laser)), zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
 - RP Photonics Encyclopedia – YAG Lasers, http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 23: BATOP Optoelectronics, <http://www.batop.com/information/microchip-laser.html>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 28: FAS Space Policy Project – Airborne Laser, <http://www.fas.org/spp/starwars/program/abl.htm>, zuletzt aufgerufen: 17.01.2014,
- Seite 31: vgl. Seite 4,
 - Lisa Pathfinder Mission, EADS Astrium, <http://gallery.astrium.eads.net/app/photopro.sk/astrium/detail?docid=92>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 32: MIT, Archimedes Death Ray: Idea Feasibility Testing, October, 2005, http://web.mit.edu/2.009/www/experiments/deathray/10_ArchimedesResult.html, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 54: Edge-Wave IS-Series, <http://www.edge-wave.de/web/produkte/short-pulse-systeme/is-serie/>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014,
- Seite 55: SFB 716, Laserablation in Metallen, <http://www.sfb716.uni-stuttgart.de/forschung/teilprojekte/projektbereich-b/b5/ergebnisse.html>, zuletzt aufgerufen: 20.01.2014

